

João Eduardo Santana Borges

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Florianópolis

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

João Eduardo Santana Borges

Florianópolis, Agosto de 2008

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

João Eduardo Santana Borges

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos em que foi realizado o trabalho, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Adroaldo Raizer, Professor Doutor
Orientador

Katia Campos de Almeida, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora

Adroaldo Raizer, Professor Doutor
Orientador

Luis Carlos M. Schlichting, Dr.

C. Celso de Brasil Camargo, Dr.

Alexandre Alberto Cotrim de Carvalho, Msc.

A meu pai, que sempre foi meu maior incentivador, amigo, confidente e acima de tudo a minha fonte de inspiração.

A minha mãe, que com seu amor e carinho imensos e incondicionais, soube me dar força e paciência para superar todos os vários obstáculos do caminho.

Agradecimentos

Em primeiro lugar ao Prof. Adroaldo Raizer, pela orientação, amizade e sobretudo pela confiança em mim depositada em todo o percurso do trabalho.

Aos meus colegas do MagLab, que em todos os momentos puderam dispor de seu tempo para auxiliar-me em tudo que foi necessário.

Aos amigos, que são o combustível da vida, pelo apoio recebido, momentos de descontração e troca de experiências. Em especial aos Engenheiros Rodrigo Miola e Rafael Diogo Scheuer, com quem tive a oportunidade de conviver durante a execução do trabalho, e que souberam compreender minhas condições e sempre me apoiaram.

À Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica o meu reconhecimento pela sua eficiência em prover suporte institucional para assegurar o êxito de trabalhos acadêmicos de seus alunos.

Aos colegas de trabalho da empresa Whirlpool®, com toda a sua prestatividade no auxílio à questões do projeto do refrigerador sob estudo.

À empresa Whirlpool S.A. – Unidade de Eletrodomésticos ® pelas facilidades oferecidas para a realização da pesquisa e de todos os ensaios, mediante a cessão de material experimental e acesso a informações relevantes aqui utilizadas.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

João Eduardo Santana Borges

Agosto / 2008

Orientador: Adroaldo Raizer, Professor Doutor.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras Chaves: “Seis Sigma”, “Refrigeradores”, “Experimentos Planejados”

Número de Páginas: 143

O presente trabalho teve como objetivo mostrar uma forma de aplicação das ferramentas da metodologia Seis Sigma, em um problema típico da área de compatibilidade eletromagnética. Um refrigerador foi o produto sob estudo sobre o qual todas as conclusões foram obtidas. Inicialmente foram criados um Mapa de Raciocínio e um Mapa de Produto, com o intuito de incentivar o raciocínio crítico sobre o problema e auxiliar na determinação de fatores a serem estudados. Seguidos a esta etapa, foram realizados 3 experimentos planejados chamados DOEs (*Design of Experiments*), que seguiram uma estrutura de raciocínio sequencial. No primeiro experimento, um estudo do sistema de medição utilizando Cartas de Controle auxiliou na determinação de quais variáveis de resposta seriam observadas. De posse dessa informação, os subsequentes experimentos mostraram e confirmaram que o maior ruído emitido pelo produto era de modo comum, e cujo acoplamento se faz via a carcaça metálica do produto. Nesse contexto, alguns fatores foram estudados tentando obter aprovação na norma apropriada com o menor custo possível, mas, dentro dos limites do trabalho, apenas a utilização de um ferrite de modo comum foi capaz de efetivamente enquadrar o produto na norma. O uso de dois ferrites na Linha e no Neutro também foi uma ferramenta eficaz quanto ao ruído conduzido de mais alta frequência. De forma geral, o resultado do trabalho mostra que são grandes as oportunidades de aprendizado, quando se utilizam ferramentas estatísticas para tratar de problemas de compatibilidade eletromagnética.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

APPLICATION OF THE SIX SIGMA (6 SIGMA) METHODOLOGY IN ELETROMAGNETIC COMPATIBILITY PROBLEM

João Eduardo Santana Borges

Agosto / 2008

Advisor: Adroaldo Raizer, Professor Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Key Words: Six Sigma, Refrigeration, Design of Experiments

Number of Pages: 143

This work had the objective to show the application of the Six Sigma methodology tools, in a typical Electromagnetic Compatibility problem. A refrigerator was the product under study, and was the one all the conclusions of the work apply. Initially, a Thought Map and a Product Map were developed with the intent of increasing the usage of critical thinking about the problem, and to aid in the discovery of which factors to use in the subsequent tests. With this information obtained, 3 Design of Experiments (DOE's) were executed in a sequential thinking structure. In the first experiment, a Measurement System Evaluation was done using Control Charts, and it helped to choose which response variables to use in the rest of the work. With this information in hands, the other experiments showed and confirmed that the biggest noise emitted by the product was a common mode noise, and it was coupling through the main communication harness, with the external metal structure of the product. In this context, some factors were better studied to get approval in the applicable standard at the lowest cost possible. Although, with the boundaries this work had, the only truly effective solution was the addition of a common mode ferrite in the ground line. The usage of two inductors in the Line and Neutral also aided in the higher frequency components of the noise. Generically speaking, this work shows some of the great opportunities of knowledge acquisition, when using statistical tools to learn about Electromagnetic Compatibility issues.

Sumário

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO EMPRESARIAL VERSUS UNIVERSITÁRIO	2
1.2. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NO DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS	3
1.3. O “SEIS SIGMA” (SIX SIGMA - 6σ).....	4
1.4. OBJETIVO DO TRABALHO	5
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO 2.....	9
SEIS SIGMA EM DETALHE.....	9
2.1. O RACIOCÍNIO CRÍTICO E O MAPA DE RACIOCÍNIO	11
2.2. O MÚLTIPLO PAPEL DOS DADOS	13
2.3. MAPAS DE PRODUTO E PROCESSO	14
2.3.1. <i>Mapa de Processo</i>	14
2.3.2. <i>Mapa de Produto</i>	16
2.4. O CONCEITO DE VARIAÇÃO.....	17
2.5. CARTAS DE CONTROLE – “CONTROL CHARTS”	19
2.5.1. <i>Árvores e Estratégias de Amostragem</i>	21
2.5.2. <i>Mecânica das Cartas de Controle</i>	22
2.6. ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO - MSE.....	25
2.7. DOE – DESIGN OF EXPERIMENTS	27
2.7.1. <i>Métodos de tratar o Ruído Experimental</i>	29
2.7.2. <i>O Princípio de Pareto</i>	30
2.8. CONCLUSÃO	31
CAPÍTULO 3.....	32
A COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	32
3.1. CONCEITOS BÁSICOS	32
3.1.1. <i>A História da Compatibilidade Eletromagnética</i>	33
3.1.2. <i>Conceitos e nomenclaturas importantes</i>	33
3.2. A INTERFERÊNCIA	35
3.3. NORMAS DE EMC	36
3.4. A CISPR 14	37
3.5. MEDIÇÃO DE EMISSÕES	39
3.6. CONCLUSÃO	42
CAPÍTULO 4.....	43
MAPEAMENTO DO PROBLEMA INICIAL COM AS FERRAMENTAS SEIS SIGMA	43
4.1. AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA – “Y”	44
4.2. BUSCA DOS FATORES A SEREM ESTUDADOS NO REFRIGERADOR – “X”.....	47
4.2.1. <i>Os Controles Eletrônicos</i>	48
4.2.2. <i>O Refrigerador</i>	51
4.2.3. <i>Mapas de Produto</i>	52
4.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA	53
4.4. CONCLUSÃO	55
CAPÍTULO 5.....	56
RESULTADOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO SEIS SIGMA	56

5.1.	O PRIMEIRO EXPERIMENTO – DOE 1	56
5.1.1.	Restrições à Randomização – DOE 1	58
5.1.2.	Planejamento final do DOE 1	60
5.1.3.	Análise do Sistema de Medição – DOE 1	63
5.1.4.	Análise do DOE 1 – Detector de Pico	66
5.1.5.	Análise do DOE 1 – Detector de Média	76
5.1.6.	Conclusões Parciais do DOE 1	76
5.2.	O SEGUNDO EXPERIMENTO – DOE 2	77
5.2.1.	Restrições à Randomização – DOE 2	79
5.2.2.	Planejamento final do DOE 2	79
5.2.3.	Análise do DOE 2 – Detector de Pico	80
5.2.4.	Análise do DOE 2 – Detector de Média	84
5.2.5.	Conclusões Parciais do DOE 2	85
5.3.	O TERCEIRO EXPERIMENTO – DOE 3	87
5.3.1.	Restrições à Randomização – DOE 3	88
5.3.2.	Planejamento final do DOE 3	89
5.3.3.	Análise do DOE 3 – Detector de Pico	90
5.3.4.	Análise do DOE 3 – Detector de Média	97
5.3.5.	Conclusões Parciais do DOE 3	97
5.4.	CONCLUSÃO	97
	CAPÍTULO 6	99
	CONCLUSÕES	99
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.2.	CONCLUSÕES	99
6.3.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	ANEXO 1 – ARRANJO DOS ENSAIOS	103
	ANEXO 2 – MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR	106
	ANEXO 3 – MAPA DE PRODUTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO	110
	ANEXO 4 – PLANEJAMENTO DOS DOES	113
	ANEXO 5 – WHOLE PLOT E SPLIT PLOT	117
	ANEXO 6 – PROGRAMA DE LEITURA E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA	120
	ANEXO 7 – PROGRAMA DE ANÁLISE – NPP E PARETO (COM FATORES ATIVOS)	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

Lista de Figuras

FIGURA 1 - MAPA DE RACIOCÍNIO INICIAL DO TRABALHO	7
FIGURA 2 - PROCESSO SEIS SIGMA. GRÁFICO COM OS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR DE ESPECIFICAÇÃO	10
FIGURA 3 - MÉTODO CIENTÍFICO COM ÊNFASE NAS PREVISÕES	12
FIGURA 4 - EXEMPLO DE MAPA DE RACIOCÍNIO. (HILD <i>ET AL.</i> [5])	13
FIGURA 5 - MAPA DE PROCESSO DE MEDIÇÃO	16
FIGURA 6 - EXEMPLO DE MAPA DE PRODUTO	17
FIGURA 7 - LÓGICA DAS CARTAS DE CONTROLE	20
FIGURA 8 - EXEMPLO DE ÁRVORE DE AMOSTRAGEM	21
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DO SUBGRUPO DE MEDIDA	22
FIGURA 10 - FORMATO DAS CARTAS DE CONTROLE.....	23
FIGURA 11 - CARTAS X-BARRA E R (MÉDIAS E AMPLITUDES) – EXTRAÍDAS DO SOFTWARE JMP® SAS	23
FIGURA 12 - EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO	30
FIGURA 13 - CORRENTES DE MODO DIFERENCIAL E COMUM.....	34
FIGURA 14 - ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO.....	35
FIGURA 15 - LIMITES DA NORMA CISPR 14.....	38
FIGURA 16 - CIRCUITO LISN - CISPR16-1 50Ω/50μH	40
FIGURA 17 – EXEMPLO DE ALGUMAS DISPOSIÇÕES PARA ENSAIO DE EMISSÕES ELETROMAGNÉTICAS CONDUZIDAS	41
FIGURA 18 - EXEMPLO DE ENSAIO COM EMISSÕES ACIMA DO LIMITE DA NORMA (QUASI-PICO APENAS)	42
FIGURA 19 - EXEMPLO DE ENSAIO COM EMISSÕES ABAIXO DO LIMITE DA NORMA (QUASI-PICO APENAS)	42
FIGURA 20 - MAPA DE RACIOCÍNIO - PARTE I	44
FIGURA 21 - RESULTADO DE TESTE DE EMISSÃO CONDUZIDA, NO PRODUTO BÁSICO SEM FILTROS	45
FIGURA 22 - REFRIGERADOR NO-FROST BRASTEMP BRM47.....	48
FIGURA 23 - PLACA PEGASUS - INTERFACE COM O USUÁRIO	49
FIGURA 24 - PLACA APOLLO - CONTROLE DE CARGAS DO PRODUTO	50
FIGURA 25 – DIAGRAMA ELÉTRICO BÁSICO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DA PLACA APOLLO	51
FIGURA 26 - PLACAS ELETRÔNICAS DENTRO DO PRODUTO	52
FIGURA 27 - FRD EXEMPLO DE UM EXPERIMENTO. EXTRAÍDO DE SANDERS E COLEMAN [23]	59
FIGURA 28 - FRD DO DOE 1	62
FIGURA 29- CARTAS DE CONTROLE - DETECTOR DE PICO (DOE 1)	64
FIGURA 30 - CARTAS DE CONTROLE - DETECTOR DE MÉDIA (DOE 1)	65
FIGURA 31 - ANÁLISE PRÁTICA - MÉDIA 1 DO DETECTOR DE PICO (COM ANOG) – DOE 1	66
FIGURA 32 - ANÁLISE CRD – MÉDIA 1 – PICO - DOE 1. GRÁFICOS OBTIDOS COM SOFTWARE JMP®	69
FIGURA 33 - EFEITO DOS FATORES – MÉDIA 1 – PICO - DOE 1. GRÁFICO OBTIDO COM SOFTWARE JMP®	70
FIGURA 34 - ANÁLISE <i>WHOLE PLOT</i> – MÉDIA 1 – PICO - DOE 1. GRÁFICO OBTIDO COM SOFTWARE JMP®	71
FIGURA 35 - ANÁLISE DO <i>SPLIT PLOT</i> - MÉDIA 1 - PICO - DOE 1	72
FIGURA 36 - ANÁLISE GRÁFICA (CRD) - MÉDIA 2 - PICO - DOE 1.....	73

FIGURA 37 - ANÁLISE GRÁFICA (CRD) - MÉDIA 3 - PICO - DOE 1.....	74
FIGURA 38 - ANÁLISE <i>SPLIT PLOT</i> - MÁXIMO 1 - PICO - DOE 1	75
FIGURA 39 - FRD DO DOE 2	80
FIGURA 40 - ANÁLISE WHOLE E SPLIT PLOT - MÉDIA 1 - PICO - DOE 2.....	82
FIGURA 41 - ANÁLISE WHOLE E SPLIT PLOT - MÉDIA 2 - PICO - DOE 2.....	83
FIGURA 42 - TRECHO DE 10MHZ A 30MHZ DO TRATAMENTO 15 DO DOE 2	84
FIGURA 43 - DETALHE DO PROTÓTIPO COM <i>CHOKE</i>	84
FIGURA 44 - DETALHE DO MEIO UTILIZADO PARA AFASTAR A REDE ELÉTRICA DA CARÇA DO PRODUTO	85
FIGURA 45 - INTERAÇÃO C*J, NO DOE 2	87
FIGURA 46 - FRD DO DOE 3	89
FIGURE 47 - ANÁLISE PRÁTICA. MÉDIA 1 – DETECTOR DE PICO – DOE3.....	91
FIGURA 48 - ANÁLISE GRÁFICA. MÉDIA 1 – DETECTOR DE PICO - DOE 3.....	92
FIGURA 49 - GRÁFICO DE AJUSTE DA FÓRMULA PREVISTA PARA MÉDIA 1 - PICO. GERADO POR JMP®.....	94
FIGURA 50 - ANÁLISE GRÁFICA - MÁXIMO 1 COM DETECTOR DE PICO. GERADO POR JMP®.....	95
FIGURA 51 - GRÁFICO DE AJUSTE DA FÓRMULA PREVISTA PARA MÁXIMO 1 - PICO. GERADO POR JMP®.....	96
FIGURA 52 - CÂMARA DE TESTES	104
FIGURA 53 - DISTÂNCIA DO PRODUTO AO CHÃO	105
FIGURA 54 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIO.....	105
FIGURA 55 - ARRANJO DO CORDÃO DE ALIMENTAÇÃO	105
FIGURA 56 - MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR - VISÃO GERAL	107
FIGURA 57 - MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR - DETALHES DE CARGAS.....	108
FIGURA 58 - MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR - DETALHE DO CONTROLE ELETRÔNICO.....	109
FIGURA 59 - MAPA DE PRODUTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	111
FIGURA 60 - MAPA DE PRODUTO DE FILTRO DE LINHA	112
FIGURA 61 - FORMULÁRIOS DE PLANEJAMENTO DE DOES. EXTRAÍDO DE MOEN[24]	114
FIGURA 62 - FORMULÁRIOS DE PLANEJAMENTO DE DOE2. EXTRAÍDO DE MOEN[24]	115
FIGURA 63 - FORMULÁRIOS DE PLANEJAMENTO DO DOE 3. EXTRAÍDO DE MOEN[24].....	116
FIGURA 64 - EXEMPLO DE RESTRIÇÃO E DIVISÃO DO EXPERIMENTO EM WHOLE E SPLIT PLOT.....	118
FIGURA 65 - DISTRIBUIÇÃO DO RUÍDO EM EXPERIMENTOS COM RESTRIÇÕES	118
FIGURA 66 - ANALISADOR DE DADOS DE ENSAIOS.....	121
FIGURA 67 – CÓDIGO FONTE PARCIAL DO ANALISADOR DE DADOS	122
FIGURA 68 – CÁLCULO DO NPP E DOS EFEITOS ATIVOS	124
FIGURA 69 – CÓDIGO FONTE DO CÁLCULO DO LENTH PSE	125
FIGURA 70 – CÓDIGO FONTE DO <i>Z-SCORE</i> E GERAÇÃO DO GRÁFICO NORMAL PLOT	126
FIGURA 71 – CÓDIGO FONTE CÁLCULO DA MARGEM DE ERRO (<i>MARGIN ERROR</i> , ME)	126
FIGURA 72 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO	127

Lista de Tabelas

TABELA 1 - DEFEITOS DE PROCESSOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE SIGMA. FONTE: BREYFOGLE [3]	10
TABELA 2 - CONSTANTES ESTATÍSTICAS PARA CÁLCULO DOS LIMITES DE CONTROLE E DESVIO PADRÃO. FONTE: WHEELER E CHAMBERS [9]	25
TABELA 3 - LIMITES PARA ELETRODOMÉSTICOS – CISPR 14-1 [14].....	37
TABELA 4 – RESULTADOS PARA O DETECTOR DE MÉDIA.....	54
TABELA 5 – RESULTADOS PARA O DETECTOR DE PICO	54
TABELA 6 - FATORES E NÍVEIS - DOE 1	61
TABELA 7 - DADOS BRUTOS - DOE 1	63
TABELA 8 - CONFUNDIMENTOS DO DOE 1	75
TABELA 9 - FATORES E NÍVEIS - DOE 2	78
TABELA 10 - CONFUNDIMENTOS DO DOE 2. ENFATIZADO INTERAÇÃO C*J.....	86
TABELA 11 - FATORES DO DOE 3	88
TABELA 12 - ANOVA - MÉDIA 1 COM DETECTOR DE PICO, DOE 3, GERADO POR JMP®.....	93

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

AMN	<i>Artificial Mains Network</i> , ou Malha Elétrica Artificial
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> , ou Análise de Variância
CRD	<i>Complete Randomized Design</i> , ou Experimento Completamente Randomizado
DOE	<i>Design of Experiment</i> , ou Experimento Planejado
EUT	<i>Equipment Under Test</i> , ou Equipamento sob Teste
Et al.	Et alii, expressão latina que significa <i>e outros</i>
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i> , ou Rede de estabilização de Impedância
MSE	<i>Measurement System Evaluation</i> , ou Avaliação do Sistema de Medição
PSE	<i>Pseudo-Standard Error</i>
R&S	Rohde & Schwarz, empresa do ramo de equipamentos de medição

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Historicamente, o ciclo mais característico e comum no mercado de trabalho, no que diz respeito aos engenheiros profissionais, começa na conclusão do curso superior e segue com sua inserção, de certa forma, um tanto quanto abrupta, no setor empresarial.

As empresas desenvolvem suas atividades em outra órbita, a maioria das vezes, alheias ao que se passa nos centros de ensino, nas faculdades e universidades. No universo brasileiro atual, pode-se perceber, nessa passagem do mundo do ensino para o mundo empresarial, uma quebra da linha do aprendizado ou do processo formativo-educativo dos indivíduos em geral, não só dos engenheiros profissionais. Muito do conhecimento teórico metodicamente conquistado durante longos anos cursando a universidade, mediante a simplificação e ordenação conveniente da realidade (não restrita, obviamente, ao campo da engenharia) passa por uma aguda transformação quando de sua aplicação prática ou de seu aproveitamento no ambiente empresarial. O engenheiro recém formado irá se incorporar no ambiente tecnológico existente, integrar grupos de trabalho, inclusive, interdisciplinares, conviver com outros profissionais mais experientes, e responderá por resultados parciais em prazos pré-definidos. Terá, enfim, que moldar-se às condições da empresa e a sua filosofia focada no lucro, no custo-benefício, no uso eficiente dos recursos escassos e na melhora incessante de sua situação competitiva e posição no mercado.

Então, coloca-se a questão: em que medida o cabedal teórico trazido do meio universitário atendeu ou atende às necessidades concretas de preparo profissional requeridas no desenvolvimento integrado e continuado de projetos práticos voltados à satisfação das demandas sociais em empresas tão díspares no meio econômico? E, de outra forma, quanto dessa bagagem teórica é aproveitada no mundo real? Sem pretender discutir níveis de ensino, sente-se que uma sólida formação agrega ao profissional uma base teórica que, apesar de insuficiente, é totalmente aplicada aos trabalhos e estudos práticos na sua atividade técnico profissional.

1.1.CONTEXTO EMPRESARIAL VERSUS UNIVERSITÁRIO

Em parte, essa transformação do processo de conhecimento que acontece ao se ingressar no meio empresarial/industrial se dá pelo fato de que, no âmbito universitário, a maior atenção está sempre voltada para uma clara e límpida demonstração dos conceitos da engenharia, o que só é possível com a simplificação do mundo real. Essa simplificação normalmente é focada na supressão de “ruídos” e de variações diversas. Exemplos disso acontecem em todas as etapas do curso superior, desde a modelagem teórica de fenômenos naturais, ondas eletromagnéticas, física, mecânica, entre outros, inicialmente considerando cenários ideais, sem a presença de variáveis desconhecidas, até aulas de laboratório onde também existe o mesmo esforço para reduzir ruídos e variações ao máximo, das mais diversas formas.

Conforme comenta BISGAARD [1], estudantes costumam sair da universidade acreditando que saber as equações de Maxwell ou as Leis de Newton, por exemplo, garante conhecimento suficiente para sua atuação profissional. No entanto, não é trazido a sua atenção quão extensos experimentos subsidiaram a geração dessas mesmas leis. Fica demasiado óbvio dizer que essa parte da educação dos engenheiros é necessária e importante, pois todo o conhecimento adquirido em cada momento é a base de tudo que virá nas etapas subseqüentes. Mas a pergunta que surge é: o que acontece quando, ao sair da universidade, o aluno se depara com grandes indústrias e sistemas de produção em massa, onde a aplicação daquele conceito que outrora lhe foi ensinado, agora está sujeito a todas as interferências do mundo real, como variações de máquinas, temperatura ambiente, ruídos eletromagnéticos diversos, operadores inexperientes, tolerâncias de diversos componentes agregados a determinado produto, etc.? E ainda, o que acontece quando em problemas do mundo real não se consegue aplicar os conceitos que, por facilidade de apresentação, foram apresentados de forma simplificada, com geometria simples e sem a presença de ruídos, variações, entre outros? É comum perceber algo nem tão inédito: nem tudo funciona como em uma bancada de testes. Não é difícil encontrar diversos exemplos multiplicando-se em todas as partes de qualquer empresa em que a teoria parece divergir da prática, onde na verdade o que está acontecendo é que não se tem o total conhecimento da teoria que se aplica naquele momento.

1.2.COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NO DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS

No âmbito da compatibilidade eletromagnética, profissionais de engenharia também sofrem com a dificuldade de unir teoria e prática. O que se nota de mais comum nas empresas é a presença de profissionais que ao longo dos anos acumularam uma carga de experiência que lhes permite resolver uma boa parte dos problemas encontrados. Fora isso, tanto esses profissionais mais experientes quanto os novatos contam com o auxílio, nas etapas iniciais do trabalho, de inúmeros guias de projeto ou dicas, que auxiliam na melhor elaboração dos projetos nas primeiras tentativas. No entanto é comum acontecerem diversos problemas, até mesmo pelo fato do assunto de compatibilidade ser de razoável complexidade teórica e prática, em todos os testes das normas relativas a Compatibilidade Eletromagnética. Problemas de controles eletrônicos que reinicializam com descargas eletrostáticas, fontes de alimentação que em determinada condição de carga interferem em aparelhos próximos, entre outros, aparecem no dia a dia de quem trabalha no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos.

Sobre esse modo de trabalho, algumas observações podem ser feitas:

- É difícil gerar conhecimento sistêmico no processo de resolução de problemas, uma vez que a solução desses consiste em geral de processos iterativos de tentativa e erro;
- Várias situações repetem-se em novos projetos, e o desconhecimento da causa raiz impede a correta documentação e prevenção das mesmas;
- Uma grande quantidade de componentes presente nas placas eletrônicas é colocada “por experiência” e, provavelmente, uma boa parte deles pode ter efeito negligenciável nos ensaios de enquadramento nas normas aplicáveis;
- É comum deixar-se de lado nos estudos fatores externos às placas eletrônicas em si. Entre estes fatores cita-se redes elétricas internas, disposição de diversas cargas elétricas do produto dentro do mesmo e sua posição relativa às redes elétricas e ao próprio controle, entre outros;

Assim sendo, no mercado de extrema competitividade e onde o tempo para lançar produtos está cada vez menor e erros não são aceitáveis, novas abordagens devem ser estudadas para serem aplicadas à Compatibilidade Eletromagnética.

1.3.O “SEIS SIGMA” (SIX SIGMA - 6σ)

No meio empresarial, em meio a diversas filosofias, ferramentas e métodos de controle de qualidade, surge o “Seis Sigma”.

Antes de iniciar dizendo o que é Seis Sigma, vale dizer o que ele não é: não é uma sociedade secreta, slogan ou clichê. Seis Sigma é um processo altamente disciplinado que nos ajuda a focar em desenvolver e entregar produtos e serviços que se aproximem o máximo possível do desejo do consumidor.

Por que “Sigma”? A letra representa o símbolo de um termo estatístico que mede dispersão de dados em torno de uma média. Considerando a média como o desejo mais puro do consumidor, este termo pode ser visto como uma medida do quão longe um dado processo ou produto se desvia de sua perfeição. A idéia central em que se fundamenta o Seis Sigma reside no fato de que, se é possível medir o quanto um dado processo se desvia do seu objetivo (que pode ser imaginado como a quantidade de “defeitos” que o processo tem), então é possível descobrir sistematicamente um meio de reduzir esta variação, tentando chegar o mais próximo possível de sua média, que no caso significa entregar ao consumidor um produto o mais próximo possível do que este deseja. Isso significa, em um processo Seis Sigma, apenas 3,4 falhas por milhão! O Seis sigma atinge seu objetivo, através da minimização da variância.

O Seis Sigma iniciou-se na década de 80, na Motorola®, e já está no dia-a-dia de muitas companhias de sucesso, como GE®, Toyota® e Whirlpool Corp. ®. A companhia Motorola® foi a pioneira no uso do Seis Sigma, e Bill Smith, o vice-presidente e gerente sênior da garantia da qualidade da época, é geralmente referenciado como “pai” da metodologia Seis Sigma.

O significado do Seis Sigma agrupa vários conceitos do gerenciamento de processos, simulação, controle estatístico de processo, manufatura enxuta, estatística avançada, estudo de variação, experimentos planejados estatisticamente (do inglês DOE - *Design of Experiments*), entre outros.

Para que uma empresa alcance seus objetivos é necessário que todos os seus integrantes conheçam quais são tais objetivos, e que eventuais mudanças nos mesmos sejam conhecidas rapidamente por toda a organização. Porém esse conhecimento não é suficiente. Para assegurar o sucesso da empresa é necessário que esses objetivos estejam vinculados à obtenção de resultados financeiros e à satisfação do cliente, bem como, à realização de ações estruturadas capazes de levar ao resultado almejado. É neste ponto que o Seis Sigma se encaixa, trazendo à tona uma metodologia estruturada com ferramentas estatísticas integradas para a resolução de problemas que afetam indiretamente o resultado financeiro da empresa.

1.4.OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é aplicar as ferramentas Seis Sigma, no âmbito da Compatibilidade Eletromagnética, para estudar, entender e melhorar sistemas eletrônicos nesse quesito da engenharia elétrica. Será utilizado uma abordagem do Seis Sigma atualmente adotada pela empresa Whirlpool – Unidade de Eletrodomésticos®, baseada fortemente no raciocínio crítico e na experimentação planejada.

O escopo desta dissertação será colocado em torno de produtos de refrigeração, do segmento de eletrodomésticos. Os produtos e questões específicas de eletrônica serão obtidos da empresa Whirlpool®.

Atualmente no segmento de refrigeração, e provavelmente em muitos outros, o trabalho de projeto de produtos contendo placas eletrônicas, freqüentemente encontra na Compatibilidade Eletromagnética (EMC) um grande desafio.

Os engenheiros eletrônicos estão munidos de uma grande gama de ferramentas e métodos para tentar evitar problemas de compatibilidade no início dos projetos, ou em suas fases iniciais de desenvolvimento. Várias “boas práticas” de projeto para EMC são utilizadas, como formato e ângulo das trilhas, controle da taxa de variação (dV/dt) de sinais digitais, desacoplamentos diversos, entre outros. De fato, o que a prática nos mostra é que dificilmente se logra convergir rapidamente para uma solução no projeto das placas para atender aos requisitos impostos pelas normas de compatibilidade, ou seja, este processo acaba sendo mais lento e mais imprevisível do que as empresas gostariam. Isso, em linhas gerais, nos leva a crer que se está trabalhando com um certo desconhecimento dos fatores que realmente são os mais críticos para o sucesso em tais projetos e normas.

A história do segmento de refrigeração doméstica é relativamente nova, uma vez que os primeiros refrigeradores impulsionados por compressão mecânica datam de meados de 1930. Nesse cenário, a eletrônica embarcada em refrigeradores tem uma história mais recente ainda, com sua introdução próxima ao final do século passado, lembrando que esta informação é baseada fortemente no histórico da empresa Whirlpool®. Os fatores de projeto relativos ao produto final (sendo esses fatores aqueles que não se localizam dentro dos circuitos eletrônicos do produto) que afetam os resultados de ensaios de compatibilidade, como roteamento de redes elétricas, posicionamento de cargas, proximidade de condutores com tipos de sinais distintos,

posicionamento de redes elétricas dentro das caixas onde estão alojadas as placas eletrônicas, entre diversos outros, normalmente são ignorados ou até mesmo desconhecidos dos engenheiros de desenvolvimento.

Como é tratado o problema da Compatibilidade Eletromagnética nos processos de desenvolvimento de novos produtos? A solução fica por conta de um sistema de tentativa e erro, onde as técnicas mais comuns aplicáveis são testadas uma a uma, mescladas ou modificadas, até que se consiga um resultado satisfatório às normas. Nesse processo, pode-se ver a criação de filtros que nem sempre são precisamente calculados, com a adição de capacitores e indutores (elementos passivos), a colocação e remoção de componentes previstos em *layout* mas não utilizados, entre outros. Além disso, a abordagem fica também focada em resolver esses problemas apenas na placa eletrônica, supondo que fatores do produto não sejam importantes, ou supondo que a importância destes fatores possa ser reduzida com elementos presentes nas próprias placas, mesmo sabendo que quando se trata desse assunto, a interação de produto e controle eletrônico é inevitável ou no mínimo muito provável.

A grande dúvida é se um trabalho realizado da maneira descrita, com a agregação ao circuito eletrônico de componentes possivelmente além do necessário, com sobrecarga nos custos, estaria otimizado. Vários problemas podem ser enumerados nesse sistema de trabalho:

- Não se documenta completamente todo o trabalho realizado. Após inúmeras tentativas, a que “resolve” o problema é a final que é documentada;
- O que se aprende com base em todos os testes que são feitos é de difícil sistematização;
- O tempo consumido pode ser considerado grande, dependendo da gravidade do problema;
- A solução encontrada muito provavelmente não está otimizada em custo.

Todos estes pontos vão contra a filosofia do Seis Sigma, onde um dos principais objetivos é reduzir o desperdício/variação, em busca dos melhores resultados financeiros para a empresa e para o consumidor final.

Para aplicação do Seis Sigma neste trabalho, escolheu-se um dos problemas que se repete com alguma frequência, no âmbito da empresa Whirlpool®, sem que sua causa exata seja conhecida. Trata-se de questões relacionadas aos testes de emissão conduzida da norma CISPR 14, visando aprovação de refrigeradores com degelo automático (do inglês, *No-Frost*) na referida norma. A constatação de que diversas placas eletrônicas desenvolvidas há poucos anos, com fontes

chaveadas, apresentaram problemas neste teste, justifica a escolha como uma boa oportunidade para aplicar a metodologia. A intenção dessa aplicação do Seis Sigma é buscar desvendar os fatores de projeto mais significativos relacionados àquele problema, mediante a utilização de uma placa eletrônica desenvolvida pela própria empresa Whirlpool® (cuja função é controlar todas as cargas elétricas do produto e que possui fonte chaveada internamente), assim unindo a metodologia Seis Sigma com o tópico Compatibilidade Eletromagnética.

A abordagem do tema acima proposto começa com a elaboração do Mapa de Raciocínio, que é uma ferramenta da metodologia a ser aplicada em todo o trabalho. Essa e as demais definições e ferramentas do Seis Sigma utilizados nesta dissertação serão descritos no próximo capítulo e mais detalhadamente no corpo do trabalho quando este assim o exigir e, em último caso, na bibliografia indicada em anexo.

O Mapa de Raciocínio seguinte para esta dissertação começa mostrando basicamente a motivação do trabalho, e onde notam-se as primeiras perguntas a serem respondidas.

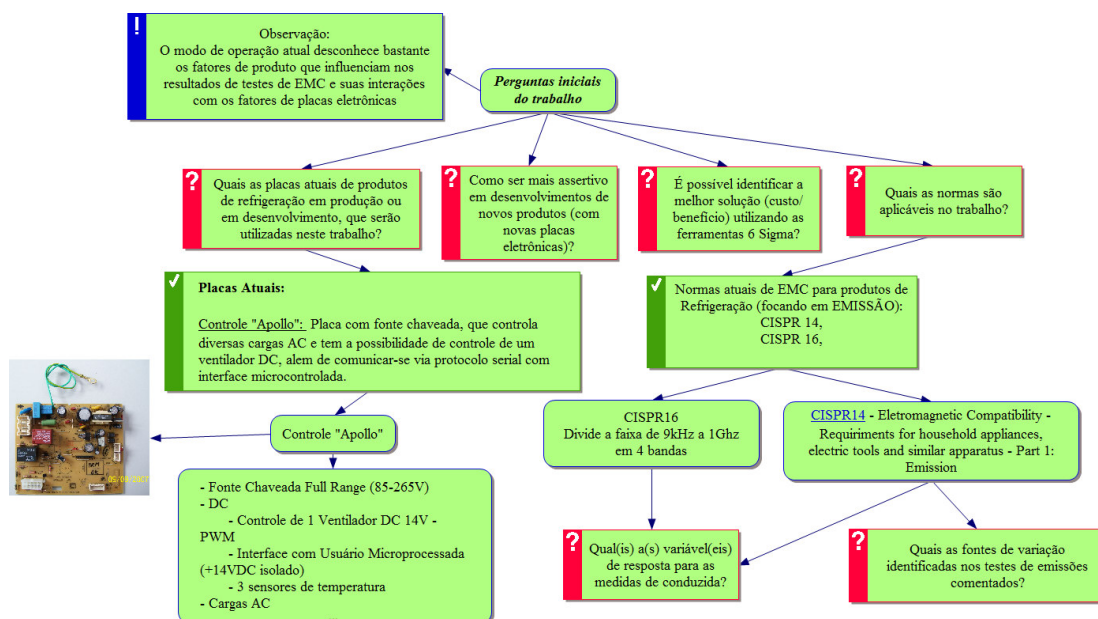


Figura 1 - Mapa de Raciocínio inicial do trabalho

Os Mapas de Raciocínio são ferramentas que requerem adaptações e atualizações em cada etapa do trabalho. Esta transformação do mapa será vista no decorrer desta dissertação.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Após a exposição breve do contexto geral e dos objetivos do presente trabalho, pode-se entrar diretamente no formato desta proposta.

Esta dissertação é composta de 6 capítulos. O presente capítulo introduz os objetivos e a motivação para sua realização. Além de apresentar o cenário empresarial no tratamento da compatibilidade eletromagnética no desenvolvimento de novos produtos, aqui é introduzida a metodologia Seis Sigma e sua aplicação que será desenvolvida nesta dissertação.

O Capítulo 2 aborda os conceitos teóricos fundamentais da metodologia Seis Sigma, com um detalhamento das ferramentas mais comuns utilizadas no mercado e que serão aqui aplicadas. Maior ênfase será dada nas ferramentas que estarão em maior evidência ao longo do trabalho. À medida em que o desenvolvimento requerer o uso de algum método ou ferramenta de “menor porte”, ou mais simples, o mesmo será explicado rapidamente no próprio texto do desenvolvimento.

O Capítulo 3 apresenta brevemente os conceitos relativos à Compatibilidade Eletromagnética (*EMC – Electromagnetic Compatibility*). Procura-se abordar, em especial, aspectos relativos às normas utilizadas no trabalho, além de breves aspectos históricos, termos utilizados, entre outros temas.

O Capítulo 4 traz o início do trabalho na descoberta do que medir, fatores importantes de produto, bem como informações específicas do segmento de refrigeração doméstica dentro da experiência da empresa Whirlpool® e, um maior detalhamento da aplicabilidade das mesmas informações neste trabalho.

Já o Capítulo 5 traz o detalhamento de todos os experimentos realizados, gráficos gerados, problemas encontrados e suas conclusões parciais. Aqui as ferramentas Seis Sigma são mostradas em mais detalhes, em diversas seções de planejamento, execução e análise dos experimentos.

A conclusão de todo o trabalho se encontra no Capítulo 6, onde vários comentários são feitos a respeito do mesmo, bem como sugestões de e para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SEIS SIGMA EM DETALHE

Seis Sigma é uma filosofia de gerenciamento empresarial cujo foco é a melhoria contínua. A filosofia Seis Sigma requer a aquisição de conhecimento (do processo) a fim de atingir resultados da empresa ou dos negócios tais como redução do tempo de ciclo, redução de defeitos, satisfação do consumidor e processos simplificados. A fim de obter conhecimento para poder manipular os níveis de saída dos processos (Y's) de forma previsível com variação mínima, precisa-se investigar as fontes de variação em potencial (x's) presentes em cada um deles. Esse estudo de variação é o que diferencia a filosofia Seis Sigma de várias outras metodologias de resolução de problemas voltados para a qualidade e produtividade. Costuma-se dizer no “meio” Seis Sigma, que a filosofia poderia ser expressa na forma de uma equação $Y = f(x)$, onde Y são as saídas do processo e x são todos os parâmetros que direta ou indiretamente afetam ou compõem a nossa saída. Essa metodologia é direcionada para a solução sistemática de problemas com alto foco no impacto ao consumidor e tendo por base a coleta de dados pertinentes aos processos sob estudo.

A letra *Sigma* (σ) representa o símbolo da medida de dispersão em torno da média (desvio padrão) gerado por um determinado processo, e *Seis* indica o número de desvios padrões que um determinado processo deve ou deveria ter entre sua média e os requisitos do cliente (internos como a engenharia, ou externos como o consumidor final). Um gráfico explicativo é mostrado na Figura 2. Em outros termos, trata-se de um processo que, mesmo com toda sua variação natural, atenda com folga aos requisitos dos clientes. Isto pode ser traduzido em um processo onde não necessite entrar no círculo vicioso inspecionar-produzir-inspecionar, uma vez que sabe-se que nosso sistema é perfeitamente capaz de entregar o que dele é requisitado.

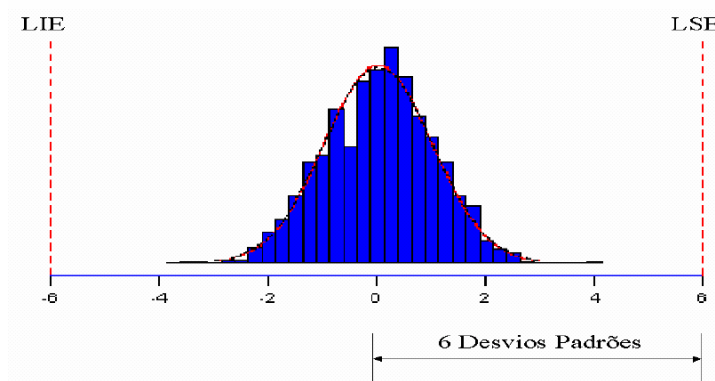


Figura 2 - Processo Seis Sigma. Gráfico com os Limites superior e inferior de especificação

Conforme citado por OLIVEIRA [2], o poder do Seis Sigma está na combinação do poder das pessoas e da eficiência do processo, através da utilização estruturada de ferramentas estatísticas com foco em resultados financeiros e na satisfação dos clientes.

A seguir coloca-se uma tabela que classifica processos, com um número de desvios padrões do mesmo. Com ela pode-se ver que quanto melhor nosso processo ou produto é, estatisticamente, muito menor é a proporção de falhas, ou não conformidades, que serão encontradas na saída do mesmo.

Tabela 1 - Defeitos de processos com diferentes níveis de Sigma. Fonte: Breyfogle [3]

Classificação em número de Sigmas	Defeitos por Milhão PPM	Rendimento (%)
2	308537	69,13
3	66807	93,32
4	6210	99,379
5	233	99,9767
6	3,4	99,99966

Pode-se notar que o emprego de estatística e ferramentas a ela associadas é intenso na filosofia Seis Sigma. No entanto, é ledô engano assumir que o coração da metodologia é puramente estatístico.

Entre os vários ciclos existentes baseados no Seis Sigma, tem-se, por exemplo, o DMAIC, que em inglês quer dizer *Define–Measure–Analyse–Improve–Control* (ou Defina–Meça–Analise–Melhore–Controle). Esse ciclo é fortemente relacionado a setores industriais. No presente

trabalho, foram aplicadas as ferramentas apropriadas, sem necessariamente seguir fortemente esse ciclo ou qualquer um em especial.

Cabe acrescentar ainda que o Seis Sigma agrupa o que existe de melhor no engenheiro, como seu raciocínio crítico, conhecimento do processo e do produto, entre outros, com conceitos de estatística, para agregar valor aos resultados de dados coletados em favor da solução de um dado problema.

2.1. O RACIOCÍNIO CRÍTICO E O MAPA DE RACIOCÍNIO

Pode-se dizer que o ponto inicial de partida da metodologia é o raciocínio crítico. Este raciocínio é encorajado para que na resolução de problemas se siga um caminho claro e bem definido, como condição para assegurar o seu sucesso. Alguns itens são essenciais em pessoas que desejam utilizar-se do raciocínio crítico, e alguns desses itens podem ser a predisposição para perguntar, um pensamento sequencial (indução/dedução), uso de caminhos paralelos de investigação, uso de dados para desenvolver, suportar ou invalidar teorias, uso do conhecimento no assunto, disciplina para refletir o aprendizado, entre outros.

Este tipo de pessoa, ou pensador crítico, utiliza o Método Científico [4] para a resolução de um problemas. O método científico pode ser descrito como o conjunto de técnicas para investigar um fenômeno, adquirindo novo conhecimento, ou corrigindo e integrando conhecimento prévio. Assim, este baseia-se em adquirir evidências observáveis, empíricas (ou seja, baseadas apenas na experiência) e mensuráveis e analisá-las com o uso da lógica. Além disso, o método científico consiste em coletar dados através de observação e experimentação, e formulação e teste de hipóteses. Uma forma comum no meio Seis Sigma de representar o método científico é mostrada na Figura 3, e pode-se notar que este enfatiza a comparação entre uma teoria ou previsão formulada e o resultado obtido de experimentação.

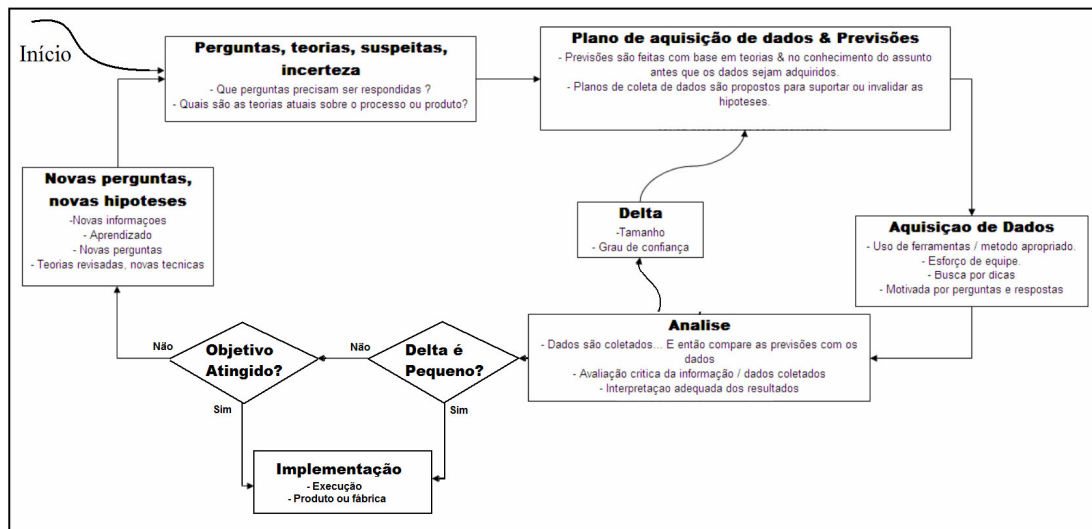


Figura 3 - Método Científico com ênfase nas previsões

Diferente das outras representações, o Seis Sigma incentiva em especial o pensador a elaborar hipóteses e teorias sobre o problema que está sendo abordado, onde baseado nelas ele tenta prever o resultado dos experimentos. Após executar esses experimentos, baseado nas previsões e nos resultados, o pensador pode então validar ou invalidar teorias, formando assim um conceito do problema de uma forma evolutiva, iterativa, onde o aprendizado é obtido gradualmente.

A grande primeira ferramenta utilizada por um *Black Belt* (pessoa treinada na filosofia Seis Sigma) é o Mapa de Raciocínio. O Mapa de Raciocínio é uma documentação contínua do conhecimento existente, das perguntas feitas, dos caminhos paralelos do trabalho necessários para responder estas perguntas, das ferramentas aplicadas para responder as perguntas, do conhecimento obtido do trabalho realizado e a direção do trabalho futuro [5].

Uma das dificuldades que as pessoas têm com o desenvolvimento de Mapas de Raciocínio é que não existe um caminho “correto” para construí-los. Não há um caminho “correto” porque há vários caminhos para melhorar o entendimento e para adquirir novo conhecimento. Alguns elementos são sim essenciais nos Mapas de Raciocínio, e alguns deles já foram parcialmente apresentados anteriormente quando fala-se do pensador crítico. Apesar disso estão colocados abaixo novamente para enfatizar este ponto:

- Um objetivo geral e quantificável do trabalho sob estudo;
- Principais alternativas e perguntas iniciais a serem consideradas (costuma-se dizer que “perguntas lideram e respostas seguem”);
- Caminhos paralelos de investigação e próximos passos;

- Ferramentas e metodologias usadas para buscar as respostas às perguntas (encorajando a adequada aplicação de ferramentas e métodos);
- Um histórico do trabalho realizado para se obter as respostas;
- Documentação das respostas às perguntas;

Existem inúmeros benefícios no uso de Mapas de Raciocínio. Como cita HILD *et al.* [5], os mapas nos ajudam a manter a informação das perguntas que foram feitas, das soluções que foram obtidas e da extensão do trabalho necessário para se chegar nas soluções. Mapas de Raciocínio permitem a transferência do conhecimento sobre o processo ou produto, comunicam a natureza hierárquica do trabalho do projeto e os muitos fatores, perguntas e questões associadas com o objetivo geral. Portanto, eles são úteis na comunicação e direcionamento do trabalho da equipe de indivíduos em diferentes caminhos dentro do mesmo projeto.

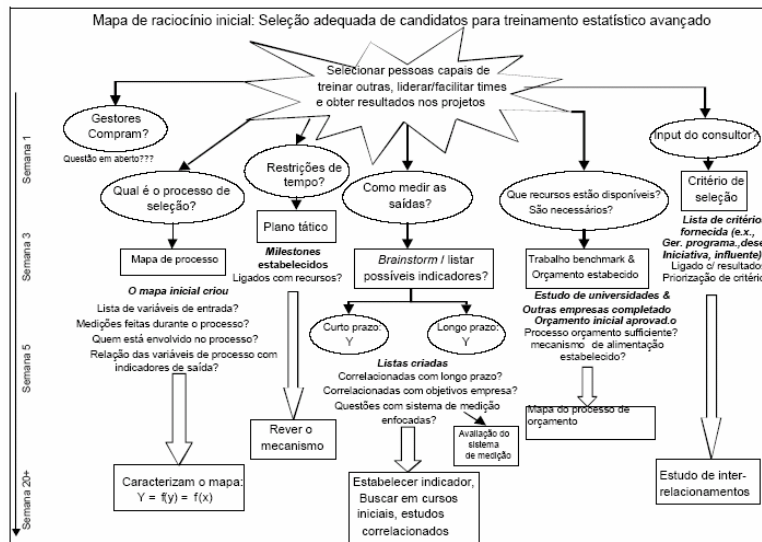


Figura 4 - Exemplo de Mapa de Raciocínio. (HILD *et al.* [5])

2.2. O MÚLTIPLO PAPEL DOS DADOS

Na aquisição de conhecimento, os dados do mundo real apresentam uma importância sem igual. Sem dados, não se pode concluir muito sobre os problemas em que se gasta o tempo do profissional. Um papel muito importante dos dados é ajudar a impedir a reação inadequada à variação aleatória. Segundo William Edwards Deming, grande estatístico americano e um dos pais

do Controle Estatístico de Processos [6], uma falha na interpretação das observações, vista em todos os lugares, é supor que todo evento (defeito, erro, acidente) é atribuído a alguém (normalmente o mais próximo), ou está relacionado a algum evento especial. O fato é que a maioria dos problemas nos serviços e na produção está no sistema. Algumas vezes, a falha é local, atribuída a alguém que está envolvido no trabalho ou que não está quando deveria estar. Fala-se de falhas do sistema como causas comuns de problemas e de falhas de eventos passageiros como causas especiais.

Observe que a aquisição de dados pode ser feita de várias formas diferentes, por exemplo, através de uma visita à biblioteca, da observação de um sistema em operação ou através da execução de um experimento adequado. Mas para ser o mais frutífero possível, o conhecimento do assunto deve estar disponível para todas estas atividades.

Dois erros comuns no uso de dados no raciocínio crítico são usar um conjunto de dados tanto para desenvolver como para confirmar as mesmas teorias e não entender as condições sob as quais os dados foram obtidos. Outra forma de pensar sobre estas questões é se você não puder fazer a pergunta (se perguntas, teorias e hipóteses não foram desenvolvidas previamente), como você será capaz de entender as respostas fornecidas pelos dados?

2.3. MAPAS DE PRODUTO E PROCESSO

Os Mapas de Processo e de Produto são ferramentas muito valiosas para documentar o que se sabe (ou acredita-se saber) destes itens. São ferramentas que auxiliam o raciocínio crítico. É através da elaboração destes mapas que o engenheiro é forçado a olhar para o que se tem em execução no projeto, ou na física do produto, para poder entender os possíveis fatores que afetam uma dada variável de resposta. Esses fatores posteriormente podem ser levados a um experimento planejado ou ferramenta similar, para fornecerem a resposta ao engenheiro ou profissional que estiver utilizando o Seis Sigma, sobre quais fatores são essencialmente significativos para a variável de resposta sob análise.

2.3.1. Mapa de Processo

O Mapa de Processo é usado para documentar e descobrir melhorias do processo, ajudar a fazer as perguntas adequadas e documentar/comunicar o que é conhecido do processo. Os mapas

de processo devem mostrar uma “foto” do processo como ele é atualmente. Eles são também a união entre fluxograma do processo e Diagrama de causa e efeito. Além disso, eles devem descrever:

- As fronteiras do processo
- Entradas e Saídas
- Principais tarefas / atividades
- Os sub-processos
- Y's, y's, x's que levam a $Y=f(y)$, onde $y=f(x)$

Segundo SANDERS *et al.* [7], a criação dos mapas de processo devem incluir de forma geral, algumas etapas. São elas:

- 1) Entender e representar o fluxo do Processo
- 2) Adicionar as entradas e saídas de cada etapa
- 3) Incluir os parâmetros de processo (y's)
- 4) Desenvolver lista de parâmetros de processo (x's)
 - 4.1. Parâmetro de processo: característica mensurável do processo que pode afetar o desempenho do produto mas não é medida no produto
- 5) Categorizar os parâmetros em:
 - >> Controláveis – fatores independentes que podem ser manipulados explicitamente pelos operadores e engenheiros, como por exemplo tempo de ciclo de uma dada máquina.
 - >> Críticos - afetam significativamente o processo e direcionam a meta
 - >> Ruído, - fatores não controláveis, caros ou preferível não controlar
 - >> Operações Padrão (SO), manutenção preventiva, treinamento, limpeza, etc.

Com este mapa em mãos, o engenheiro poderá planejar experimentos para entender os problemas de qualidade e atraso de projeto de forma geral. A seguir mostra-se um exemplo de Mapa de Processo de um dado processo de medição.

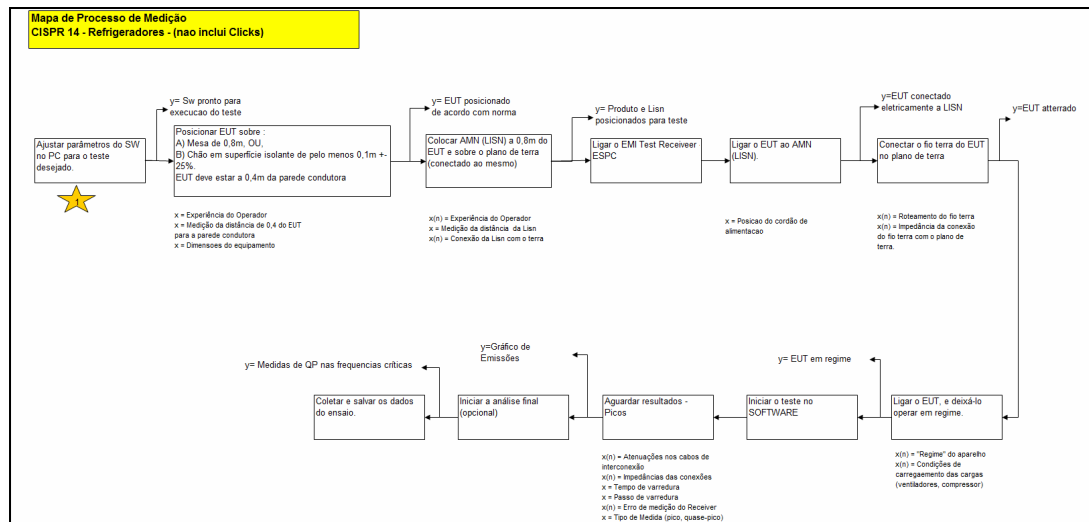


Figura 5 - Mapa de Processo de Medição

2.3.2. Mapa de Produto

O Mapa de Produto é similar ao Mapa de Processo em vários aspectos. A maior diferença é que no Mapa de Produto desenha-se o que se acredita conhecer do produto, relativo ao seu funcionamento, focado na variável de resposta investigada. O caminho de criação deste mapa é similar também ao Mapa de Processo. Essas etapas são:

- 1) Criação do Diagrama de Blocos
- 2) Y's (ao consumidor)
- 3) y's (coisas que afetam o Y em física, química, mecânica, etc.)
- 4) x (afetam os y's)
- 5) Categorizar os parâmetros (x's)
 - >> Ruído, Controlável, etc (ver definição no Mapa de Processo)

Um exemplo de Mapa de Produto pode ser visto a seguir.

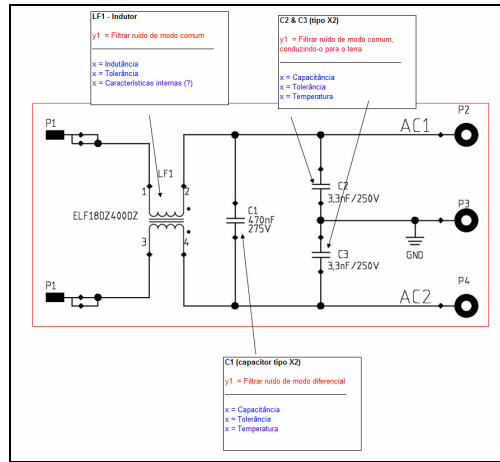


Figura 6 - Exemplo de Mapa de Produto

2.4. O CONCEITO DE VARIAÇÃO

Ao entrar na Era da Revolução Industrial houve uma quebra do processo produtivo existente, de produtos feitos à mão, para produção em escala, inclusive de produtos de várias partes intercambiáveis. Notou-se então que por mais que se tente, não existem duas peças completamente idênticas. Logo, os produtores tiveram que se conformar com peças similares, o que levou a uma situação onde peças suficientemente similares caberiam ou serviriam em suas respectivas posições, e o produto funcionaria bem, ou mais ou menos. Assim especificações foram feitas para definir o quão similar as partes deveriam ser para se encaixar no produto, e toda a variação foi classificada em dois tipos:

Permissível- atende os requisitos de engenharia;

Excessiva- fora dos requisitos de engenharia.

Em resumo, esse conceito de variação levou a sistemas complexos de manufatura, onde fabricação, inspeção, retrabalho e sucateamento eram etapas que se alternavam.

Com isso surgiu um grande conflito, onde produtores sempre desejavam especificações mais relaxadas e consumidores especificações mais apertadas, e o profissional de engenharia ficou no meio do fogo cruzado. Esse conflito obscureceu o problema original e fundamental: como fabricar partes com a menor variação possível? Na década de 50, o Prof. Genichi Taguchi propôs um método e afirmou que a qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor esperado da mesma. Os fatores chamados "Ruído" (temperatura,

umidade, poeira, deterioração, etc.) causam tais desvios e resultam em perda de qualidade do produto. Este "prejuízo" pode ser avaliado através de uma "função perda" que foi inicialmente proposta pelo professor. Resumindo, Taguchi afirma que quanto menor a variação que se tem na produção, maiores serão os ganhos financeiros.

Anterior a Taguchi, na década de 20, o Dr. Walter Shewhart nos laboratórios da Bell®, definiu um novo conceito de variação com base em seus estudos. Suas colocações a respeito de variação a classificam como variação sob controle e fora de controle. Uma variação sob controle é caracterizada por um padrão estável e consistente de variação sobre o tempo. É uma variação aleatória e inevitável. Uma variação fora de controle é caracterizada por um padrão de variação que muda com o tempo. Shewhart atribui a este padrão de variação a causas assinaláveis ou especiais.

A variação fora de controle, como supracitada, é atribuída a uma causa assinalável, o que em resumo quer dizer que é uma causa que pode ser apontada. Exemplos de causas especiais podem ser quedas de energia, operadores inexperientes, materiais diferentes, etc. Além de ter um grande impacto nos dados (essas causas assinaláveis), elas também minam o conceito de previsibilidade. Em artigo Shewhart escreveu:

“Um fenômeno será dito controlável quando, através do uso de experiência passada, nós pode-se, ao menos dentro de limites, prever como o fenômeno se espera que varie no futuro”. SHEWHART [8]

Quando na presença apenas de causas comuns, ou seja, com um processo de variação sob controle, este é dito estável e consistente. A variação presente no processo consiste apenas aquela inerente ao próprio processo, e, logo, para reduzir variação, o próprio processo deve ser mudado. Isso pode significar mudar o processo, o produto ou ambos.

Enfatizando os conceitos apresentados acima, pode-se dizer que tudo que acontece em determinado processo ou produto é devido a uma de duas possíveis causas:

- Causas comuns – aleatórias e inerentes ao processo
- Causas especiais – chamadas também de assinaláveis. Relativas a acontecimentos que podem ser apontados (falhas de operadores, quebra de máquina, erro de digitação, etc.).

Logo, como será melhor explicado nas seções vindouras, quando os engenheiros estão trabalhando em determinado problema, deve-se inicialmente determinar a existência de causas especiais e proceder com a eliminação das mesmas, antes de aplicar mais ferramenta Seis Sigma, ou tirar conclusões precipitadas.

Segundo WHEELER e CHAMBERS [9], podem-se imaginar 4 possíveis cenários:

- 1) Estado IDEAL: um processo sob controle e com peças saindo conforme especificação.

- 2) Estado LIMIAR: um processo sob controle, mas com algumas peças saindo fora da especificação. Deve-se mudar o projeto, processo ou ambos
- 3) Estado A BEIRA do CAOS: um processo fora de controle, mas com peças saindo dentro da especificação. É um processo onde a qualquer momento uma causa especial pode causar peças não conformes.
- 4) Estado do CAOS: um processo fora de controle e com peças saindo fora da especificação.

O meio de sair dos estados 3 e 4 (que são estados extremamente indesejáveis) e se aproximar do ideal, estando entre o estado 1 e 2, conforme proposto pelo Dr. Shewhart é mediante a utilização de Cartas de Controle.

2.5. CARTAS DE CONTROLE – “*CONTROL CHARTS*”

Distinguidas as variações sob controle (variações criadas apenas por causas comuns) e as fora de controle (devido a causas especiais), as Cartas de Controle foram criadas para identificar essas duas formas de variação nos processos. A questão endereçada pelas Cartas de Controle é um tanto quanto diferente das questões que são geralmente consideradas pelas práticas estatísticas, ou seja, ao invés de procurar um modelo teórico sobre um fenômeno natural bem determinado através dos dados, as cartas procuram determinar se uma sequência de dados pode ser utilizada para previsão do que ocorrerá no futuro.

A dedução envolve uma progressão lógica de princípios gerais para específicos e conclusões inevitáveis. Nenhuma extrapolação é necessária. Um processo indutivo envolve extrapolação de observações específicas de volta a princípios gerais. Essa progressão de específico para geral nunca é tão fácil, e sempre envolve um certo grau de incerteza.

Argumentos dedutivos usam interpolação, enquanto argumentos indutivos usam extrapolação. Logo percebe-se que, em operações do mundo real, previsão está sempre envolvida. Esta previsão requer a própria extrapolação e, conseqüentemente, os engenheiros, com base em conhecimento adquirido, experiências, entre outros, são requisitados a prever o que acontecerá com produtos e processos ao longo do tempo.

As Cartas de Controle são ferramentas para problemas de indução do mundo real. Quando a previsão é factível e apropriada, elas darão as bases para as previsões. Quando a precisão não for factível ou for inapropriada devido à variação fora de controle, elas avisarão dessa instabilidade. A lógica por trás das Cartas de Controle é a seguinte (em linhas gerais):

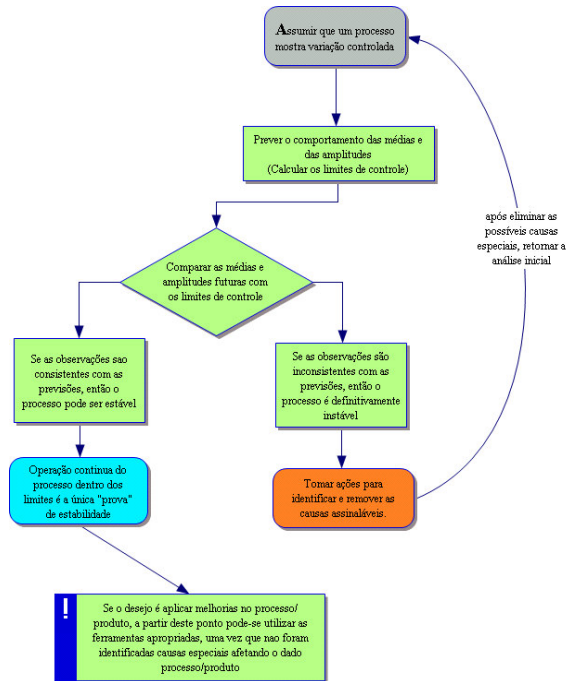


Figura 7 - Lógica das Cartas de Controle

As Cartas de Controle tem suas bases formadas em alguns conceitos de estatística básica. Considerando uma amostra de n observações – x_1, x_2, \dots, x_n , pode-se definir:

- a) Média Amostral – Soma de todos os dados, seguidos de divisão da quantidade de valores. É uma medida de tendência central.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

- b) Amplitude Amostral – Maior valor de um conjunto de dados, subtraído o menor valor. É uma medida de dispersão.

$$R = x_{máx} - x_{mín} \quad (2-2)$$

- c) Variância Amostral – A variância, S^2 , de uma amostra de n medidas é igual à soma dos quadrados dos desvios em relação a média. É uma medida de dispersão

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2-3)$$

- d) Desvio Padrão – É a raiz quadrada da Variância. É uma medida de dispersão

$$S = \sqrt{S^2} \quad (2-4)$$

Dependendo do tamanho do subgrupo utilizado, pode-se usar vários tipos de Cartas de Controle, entre elas a carta X-barra/R, X-barra/S entre outros. O conjunto X-barra/R é muito comum com pequenos tamanhos de subgrupo (em geral menor que 10), enquanto o X-barra/S é mais comum para subgrupos maiores. O conjunto de Cartas de Controle mais comum é formado pela carta de médias (conhecido como carta X-barra ou \bar{X}) e pela carta de amplitudes (conhecido como carta R, do inglês *ranges*). Estes gráficos são construídos dentro de uma definição de subgrupo. O que é desenhado nestas cartas são as MÉDIAS (no caso do X-barra) e as AMPLITUDES (no caso do R) de um determinado subgrupo amostrado. Para explicar melhor o que este subgrupo quer dizer, deve-se falar de Árvore de Amostragem, e do assunto correlato de Estratégia de Amostragem.

2.5.1. Árvores e Estratégias de Amostragem

A árvore de amostragem (ou em inglês *Sampling Tree*) é, em poucas palavras, uma representação da execução de um dado experimento. Esta é uma ferramenta gráfica que conta detalhes do experimento que vão servir para direcionar as conclusões. Ao criarmos as árvores de amostragem, deve-se considerar o que se chama de fontes de variação, que por sua vez é tudo aquilo que pode ser a causa de variações de uma medida qualquer. Estas são conhecidas como os 6 M's, e estão relacionadas a:

- Máquinas, Materiais, Medidas, Métodos, Meio Ambiente e Mão de obra.

A intenção de qualquer árvore de amostragem é representar todas as possíveis fontes de variação, ou seja tudo que interessa, em determinado experimento. Quem executou, quais e quantos lotes de matéria prima, quais períodos do dia, quais máquinas, estão entre as fontes de variação que são representadas na árvore. Abaixo mostra-se uma árvore de amostragem de exemplo:

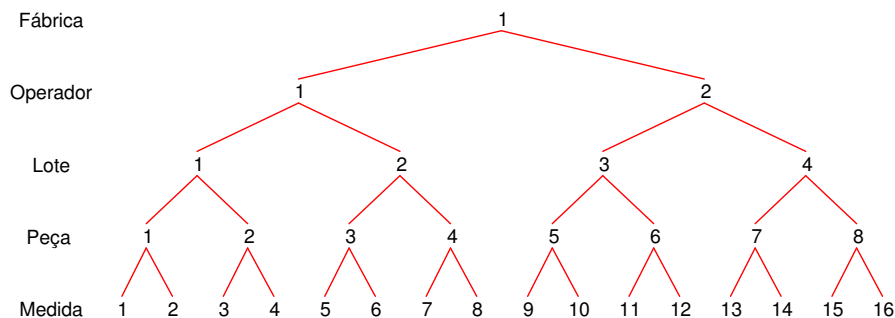


Figura 8 - Exemplo de Árvore de Amostragem

Após entendermos o que é uma árvore de amostragem, pode-se discorrer um pouco sobre o que seria uma estratégia de amostragem. Ao elaborar um determinado experimento, o engenheiro pode optar por diversas possíveis árvores de amostragem. Cada árvore será capaz de responder algumas determinadas perguntas, a partir de sua construção. Dependendo da árvore elaborada, os resultados podem ter uma interpretação ou outra.

Entrando um pouco mais nos detalhes da árvore, um conceito a ela associado e já mencionado anteriormente, que é essencial à elaboração de Cartas de Controle, é o subgrupo. O subgrupo nada mais é do que o nível da árvore que será analisado no momento. Tomando por base o experimento mostrado na Figura 8, o primeiro subgrupo que seria naturalmente analisado seria o das MEDIDAS. Pode se representar este primeiro subgrupo a ser analisado por meio da Figura 9.

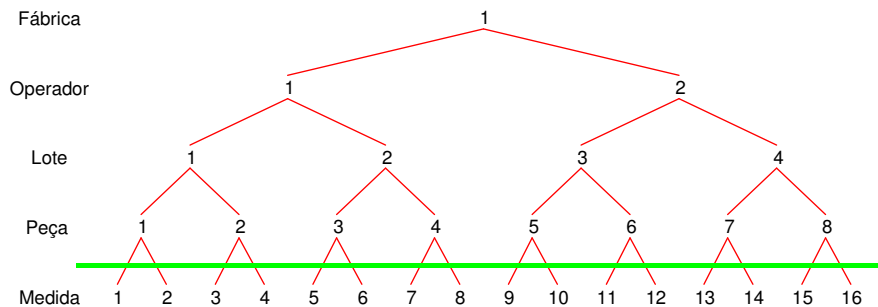


Figura 9 - Representação do subgrupo de Medida

Este conceito de subgrupo é essencial para entender a mecânica das cartas mostrada na próxima seção. Deve-se notar que pode-se “subir” na árvore, mudando o que é denominado de subgrupo. Ou seja, após analisar o subgrupo medida, que no exemplo mostrado tem tamanho de $n=2$, ou seja, 2 elementos, pode-se desejar analisar o subgrupo peça. Para tal análise, sumariza-se os dados de medida, que no caso seria calcular a média das medidas duas a duas, e, ao obtermos um valor apenas por peça, pode-se estudar este subgrupo. A título de exemplo, este subgrupo também teria 2 elementos.

2.5.2. Mecânica das Cartas de Controle

Uma vez mostrado o que seria um árvore de amostragem, e apresentado o conceito de subgrupo, é possível trabalhar na elaboração das cartas em si. Uma vez que tem-se uma determinada árvore, com um determinado subgrupo de interesse, o que a carta ajuda a responder é

o que varia e o que não varia dentro do subgrupo, e o que varia e o que não varia entre os vários subgrupos. As Cartas de Controle tem o seguinte formato:

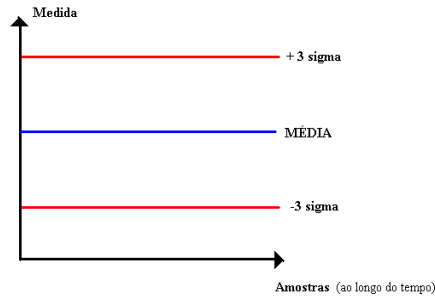


Figura 10 - Formato das Cartas de Controle

Neste formato, os dados coletados são adicionados nos gráficos, onde pode-se ver em vermelho o que é chamado de Limites de Controle. Estes limites de controle são calculados a partir da média e da amplitude do subgrupo. Estes limites representam a variação de + 3 desvios padrão e - 3 desvios padrão, ou seja, $\pm 3\sigma$, a partir da média das medidas. Isto quer dizer que todos os valores que estiverem dentro dos limites, estão contidos na curva normal do experimento, sendo assim causados por variação de causa comum. Se forem obtidos pontos fora dos limites de controle, diz-se que existe a evidência de causas especiais no experimento.

A partir do formato geral das cartas, abaixo pode-se ver em um exemplo as cartas X-barra (médias) e de R (amplitudes):

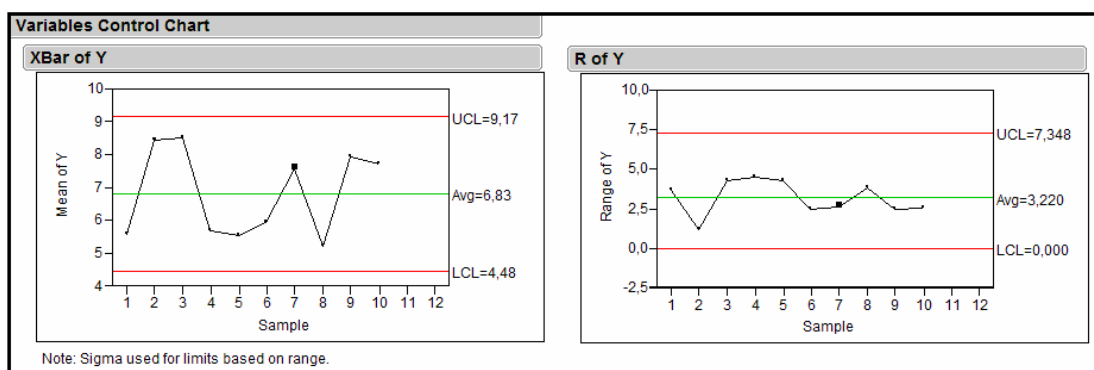


Figura 11 - Cartas X-barra e R (médias e amplitudes) – Extraídas do Software JMP® SAS

O cálculo dos limites da carta R, ou de amplitudes, são apresentados a seguir:

$$LSC_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (2-5)$$

$$LIC_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (2-6)$$

onde LSC significa Limite Superior de Controle, LIC significa Limite Inferior de controle e \bar{R} é amplitude média calculada a partir de todos os subgrupos do experimento. Os valores de D4 e D3 são tabelados de acordo com a Tabela 2-2.

A partir dos parâmetros calculados no gráfico anterior, calcula-se os limites do gráfico de Médias, ou X-barra:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (2-7)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (2-8)$$

onde LIC e LSC são limites similares aos do gráfico R, A_2 é uma constante também presente na Tabela 2-2, $\bar{\bar{X}}$ é a média das médias dos subgrupos.

Foi demonstrado [10] [11] que existe uma relação entre a amplitude e o desvio padrão de uma distribuição normal, que depende apenas do tamanho do subgrupo, ou n. Assim, também pode-se calcular o desvio padrão estimado a partir destes mesmos dados do subgrupo, desde que não sejam constatadas causas especiais no experimento. O cálculo é feito da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2-9)$$

Pode-se dizer então que d_2 é um fator de correção, com a suposição de uma distribuição normal. As constantes integrantes das fórmulas acima podem ser apresentadas em uma tabela como a que se segue, até o limite de um subgrupo de 10 elementos. Para maiores subgrupos, pequenas variações do cálculo são usadas, conforme mostrado por CHAMBERS *et al.* [9].

Tabela 2 - Constantes estatísticas para cálculo dos limites de controle e desvio padrão. Fonte: Wheeler e Chambers [9]

Tamanho do Subgrupo	A ₂	D ₃	D ₄	d ₂
2	1,88		3,267	1,128
3	1,023		2,574	1,693
4	0,729		2,282	2,059
5	0,577		2,114	2,326
6	0,483		2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,97
10	0,308	0,223	1,777	3,078

Durante a análise dos experimentos, a carta R é a primeira a ser criada. Esta carta indica se nosso sistema está com indícios de causas especiais ou se está em princípio estatisticamente sob controle. Em outras palavras, a presença de uma causa especial neste gráfico, ou seja, ponto fora dos limites de controle, indica que deve-se buscar estas causas e eliminá-las do processo em questão. Se não tivermos pontos fora de controle, diz-se que o sistema é SPC (do inglês *Stable, Predictable and Consistent*), que quer dizer Estável, Previsível e Consistente. Sendo assim, pode-se passar para a análise da carta X-barra.

Na carta X-barra, com o estudo das amplitudes, a interpretação em linhas gerais é que, pontos fora dos limites de controle mostram variação entre os subgrupos, enquanto que pontos que estejam dentro dos limites mostram variação tanto dentro quanto entre subgrupos. Dependendo do que está sob análise na carta de amostragem, a presença de pontos fora dos limites pode ou não significar algum problema com o processo, ou apenas é um indicativo de variação em outro subgrupo.

2.6. ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO - MSE

Um dos campos onde são utilizadas as Cartas de Controle, é na avaliação de sistemas de medição. O objetivo de um estudo MSE, do inglês *Measurement System Evaluation*, é fornecer informações relevantes sobre o sistema que está sendo usado para medir as características de interesse. É importante lembrar que em um processo de aprendizado, onde procura-se desenvolver

novos dispositivos ou métodos, ou se deseja melhorar a qualidade de qualquer componente, não se pode obter nenhuma melhoria, se essa não for passível de medição.

A variação total de um sistema de medição é a somatória de duas grandes fontes de variação, que são o processo em si, que pode ser de fabricação ou outro qualquer de interesse, e a variação da medição. O grande interesse é manter a variação da medição pequena o suficiente para que se possa detectar as variações do processo, de forma a ter a possibilidade de obter informações suficientes para entendê-lo e aplicar as melhorias necessárias ao mesmo.

Inicialmente, deve-se definir o que é esperado ou necessário de um sistema de medição, definindo quais perguntas se quer responder. Basicamente, em termos metrológicos [12], busca-se saber do sistema de medição sua:

- Estabilidade: Aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.
- Resolução ou Discriminação: Menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. Observações: Para dispositivo mostrador digital é a variação na indicação quando o dígito menos significativo varia de uma unidade.
- Repetitividade: Aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição.
- Exatidão (*accuracy*): Grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando.
- Reprodutibilidade: Grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição.

Como deve-se fazer em todo ensaio, a avaliação MSE requer uma árvore de amostragem. Ainda utilizando o exemplo da Figura 9 - Representação do subgrupo de Medida, usa-se das Cartas de Controle para responder as perguntas acima.

A primeira pergunta a ser respondida é se o sistema é SPC, ou seja, se é estável e pode-se confiar no mesmo. Esta pergunta é respondida em um no gráfico R. Se este estiver sob controle, o sistema é considerado SPC e livre de causas especiais no subgrupo de medidas. Este quesito deve ser sempre analisado, pois em um sistema instável não pode-se tirar conclusões, devido a presença de causas especiais. A próxima pergunta, também relacionada a carta R é se o sistema possui discriminação adequada. Isto pode ser visto analisando a quantidade de 'plataformas', ou níveis

onde a carta R passa nos dados. Outra forma é analisar os limites desta carta, para determinar qual é a discriminação deste subgrupo.

Após analisar a carta R, as perguntas que são respondidas através da carta X-barra são as relativas a repetitividade e a exatidão. Na carta de médias, uma vez que está em análise o subgrupo das medidas, um gráfico sob controle indica que não se consegue distinguir estatisticamente todos os outros níveis da árvore de amostragem de nosso experimento. Em outras palavras, a nossa variação de medição é muito maior que a variação do processo, o que impede aprendizado com este sistema. Um sistema com incerteza adequada mostrará a maior parte dos dados coletados fora dos limites de controle. A exatidão é vista a partir da linha central do gráfico das médias, comparando este com o valor padrão esperado, ou valor mestre.

A questão da reprodutibilidade consiste essencialmente em incluir na árvore do experimento diferentes operadores, máquinas, dias, de forma a aumentar o espaço de inferência do teste, além de garantir que o comportamento independe destas fontes de variação. No desenvolvimento do trabalho, um MSE será realizado, fornecendo maiores detalhes desta ferramenta dos modos de utilizá-la.

2.7. DOE – DESIGN OF EXPERIMENTS

A base de todo aprendizado e de sua melhoria contínua, é o conhecimento. A fim de aumentar o conhecimento e aprender, duas coisas necessitam acontecer simultaneamente: algo acontecer, o que seria um evento significativo, e alguém precisa notar o que aconteceu, que seria chamado um observador perceptivo. Um experimento é um convite para que um evento informativo ocorra. Pode-se então definir experimentação como: manipulação de fatores controláveis ou variáveis independentes, em diferentes níveis para ver o efeito sobre alguma resposta ou variável dependente. Logo o meio mais indicado para obter o conhecimento necessário para entender determinados problemas, ou obter melhorias de qualidade entre outros, é a execução de experimentos planejados.

Experimentos estatisticamente planejados são procedimentos eficientes para descobrir as relações entre fatores independentes e variáveis de resposta. Existem vários métodos de experimentação, com diferentes características, dentre os quais citam-se :

- Tentativa e erro
- Um fator por vez (do inglês *OFAT – One factor at a time*)
- Fatorial completo

- Fatorial fracionado

O método de tentativa e erro tem como objetivo fornecer uma solução rápida para um problema específico. Neste tipo de experimento, o conhecimento não é expandido, mas geralmente prejudicado. Os experimentos *OFAT* consistem em variar um fator independente por vez, mantendo todos os demais constantes. Com grandes quantidades de fatores, este método pode tomar muito tempo, além de não considerar interações entre fatores. Além disso, pode-se presumir que é possível manter todas as variáveis constantes enquanto se manipula apenas uma? Em geral, a experiência mostra que não. Os experimentos fatoriais consistem em criar combinações para os fatores a serem testados.

No caso do fatorial completo, a intenção é testar todas as possíveis combinações de todos os fatores do experimento. Este método é indicado quando já tem-se muito conhecimento de um dado problema e a quantidade remanescente de fatores está reduzida. Com muitos fatores, o número de experimentos aumenta bastante, como por exemplo, um experimento com 3 fatores em dois níveis cada um, geraria 8 experimentos, ou tratamentos, para ser um fatorial completo. Com apenas a adição de um fator, a quantidade de experimentos, sobe para 16 e assim continua aumentando a medida que fatores são adicionados.

Os experimentos fatoriais fracionados analisam somente uma fração de todas as combinações possíveis contidas em um fatorial completo. Portanto, se houver muitos fatores sendo investigados, a informação pode ser obtida com menos investimento. O fatorial fracionado foi o que aumentou significativamente o uso de experimentos estatísticos no mundo. Os recursos necessários para completar um fatorial fracionado são administráveis e abre-se mão de pouca informação.

As limitações dos experimentos fracionados seriam:

- Abrir mão de algumas interações
- Pouca experiência em geral para seu uso
- Medo de estatísticas que muitos engenheiros tem. Em geral falta de conhecimento profundo para compreender o poder deste tipo de experimento

De maneira geral, para um aprendizado consistente, uma estratégia sistemática de experimentação deve ser adotada. Dificilmente os problemas são resolvidos com um experimento apenas. Algumas dicas gerais sobre experimentação :

- Usar experimentos de dois níveis nos estágios iniciais
- Experimentos subsequentes mostrarão relações complexas.
- Interações podem ser entendidas próximo ao ótimo

Um grande conceito por trás do DOE é o uso da estatística para separar fatores que influenciam a variável de resposta significativamente e ruídos. O precursor do método foi o inglês Sir. Ronald Aylmer Fisher, que na década de 1920 em seus estudos no campo criou os princípios do DOE e do método de ANOVA, ou Análise de Variância (do inglês *Analysis of Variance*).

2.7.1. Métodos de tratar o Ruído Experimental

Quando o cientista se prepara para planejar um experimento, uma das coisas que deve ser levado em consideração é qual (ou quais) será a estratégia de tratamento de ruído que será empregada. Em linhas gerais, tem-se 3 grandes meios de lidar com ruído ou erro em um experimento, sendo estes:

- Randomização – A randomização de forma geral é necessária pois os métodos matemáticos de cálculo de significância estatística assumem em geral o uso de variáveis aleatórias independentes. Além disso, a randomização minimiza muito a chance de ocorrer algum ruído que esteja alinhado com algum fator. Quando não é possível randomizar completamente um experimento, deve-se levar isso em consideração na análise do mesmo.
- Repetição - A repetição pode ser a execução de mais de uma medida de determinado tratamento, ou pode ser, em experimentos que permitam, a execução de mais de uma peça, considerando-se que a maioria das condições para a criação da mesma tenham se mantido constantes ou quase constantes. A repetição permite que se obtenha uma melhor estimativa para o resultado do tratamento, além de permitir estudar não só a média, mas a variação do mesmo.
- Réplica – A réplica se assemelha muito com a repetição, mas a mesma tem a característica de tentar permitir que as condições de execução do experimento mudem de acordo com sua natureza. A execução de réplicas permite nas análises a estimação do ruído do experimento, e sua comparação com o efeito dos fatores
- Bloco – O bloco é um arranjo das unidades experimentais em grupos, ou blocos, que são similares entre si. Assim sendo, um bloco pode ser lotes de material, onde dentro de um lote as características são homogêneas. O tratamento de bloco permite um aumento significativo do espaço de inferência do estudo.

2.7.2. O Princípio de Pareto

Um princípio foi nomeado pelo estatístico J.M. Duran, no final da década de 40, em homenagem a Vilfredo Pareto, um economista italiano. Este princípio baseia-se na observação, na indústria e no ambiente, de que há poucos elementos críticos “vitais” em qualquer evento significativo. Estes elementos devem ser abordados primeiro, por uma questão de prioridade. Além disso há muitos elementos “triviais” que oferecem oportunidade, mas devem ser abordados de acordo com as oportunidades. A seguir, pode-se ver um gráfico que exemplifica o princípio de Pareto, onde pode-se ver claramente que existem fatores cruciais e outros menos importantes.

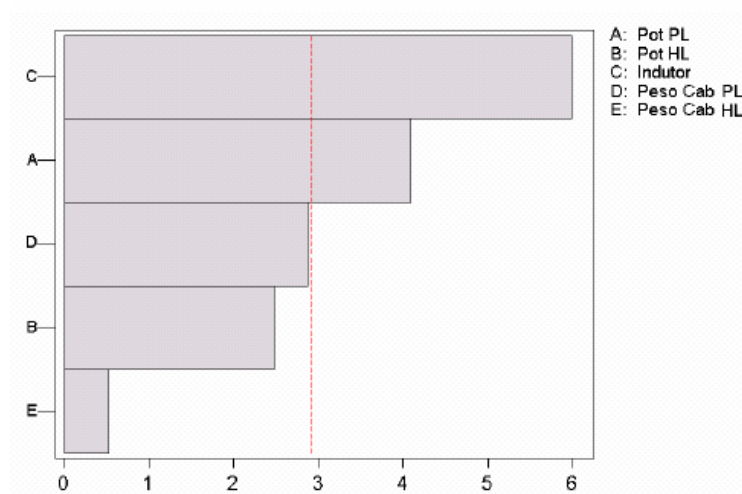


Figura 12 - Exemplo de gráfico de Pareto

O princípio de Pareto é levado em consideração quando executa-se experimentos fatoriais não replicados, uma vez que na ausência de tratamentos que permitam estimar o erro experimental, esta estimativa é feita com os fatores de menor efeito. O meio mais comum, e encontrado na maioria dos programas estatísticos de computador, foi definido por LENTH [13], e inclui uso de gráficos de probabilidade normal, associados com o cálculo de um pseudo erro, chamado de PSE (do inglês, *Pseudo Standard Error*), e do cálculo de significância estatística que utiliza a distribuição de *t-Student*. Isto significa que, é possível determinar em quais fatores o engenheiro deve focar seus esforços, uma vez que os demais são estatisticamente insignificantes. Obviamente que, decisões em projetos de engenharia são baseados não só nas conclusões obtidas estatisticamente, mas também em um sólido conhecimento do problema sob estudo.

2.8. CONCLUSÃO

A metodologia é utilizada em várias empresas no mundo que reconhecem nela os quesitos essenciais para elevar o patamar de qualidade, produtividade e tecnologia de seus produtos e serviços. As ferramentas Seis Sigma permitem que o profissional aumente sua capacidade de tomada de decisões baseado firmemente no raciocínio crítico sobre o problema, nos dados coletados e principalmente no seu conhecimento do assunto. Assim sendo, apresentar-se-á o ramo da engenharia sob o qual as ferramentas serão aplicadas neste trabalho, sendo este a Compatibilidade Eletromagnética.

CAPÍTULO 3

A COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

O objetivo deste capítulo é fornecer fundamentação teórica básica, para o entendimento do que seria a Compatibilidade Eletromagnética, do inglês *EMC – Electromagnetic Compatibility*. Será abordado com mais ênfase o item de emissões eletromagnéticas, principalmente a conduzida, uma vez que será o foco deste trabalho, na aplicação das ferramentas Seis Sigma.

3.1.CONCEITOS BÁSICOS

Dentro do ambiente em que vivemos, o eletromagnetismo nos cerca. Diversos fenômenos naturais acontecem diariamente gerando ondas e campos eletromagnéticos, como por exemplo explosões solares ou raios. Além disso todos os equipamentos elétricos e eletrônicos que se utilizam de energia elétrica, emitem energia eletromagnética de diversas formas, intencionalmente ou não. Além dessa emissão, os equipamentos, por estarem inseridos neste ambiente eletromagnético, também estão sujeitos a ação de emissões de outros equipamentos ou fenômenos naturais. Se estas emissões são de grande intensidade podem gerar interferência no funcionamento normal dos dispositivos eletrônicos.

Sendo assim, para que um sistema elétrico ou eletrônico seja considerado eletromagneticamente compatível, este deve ser capaz de funcionar corretamente sob a ação de emissões de outros equipamentos, e também não interferir, com sua própria emissão, no funcionamento de outros equipamentos eletrônicos. Este é o princípio fundamental da CEM – Compatibilidade Eletromagnética. Mais claramente, para um equipamento estar conforme aspectos de CEM, ele deve:

- 1) Emitir níveis toleráveis de ruídos conduzidos e radiados
- 2) Funcionar adequadamente em ambientes onde há ruídos radiados e conduzidos

Para assegurar que os dispositivos ou produtos estejam em conformidade com esses itens, normas e regulamentações, através do estudo dos fenômenos físicos, foram capazes de estabelecer padrões de testes e medições afim de garantir a coexistência de todos os equipamentos eletrônicos em nosso ambiente eletromagnético.

3.1.1. A História da Compatibilidade Eletromagnética

A Interferência Eletromagnética (EMI) teve seus primeiros artigos técnicos publicados em alguns jornais técnicos, na década de 20. Já no ano de 1934, surgiu o CISPR – Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas, cujo trabalho tratava de interferências de radiofrequência. Este comitê foi criado dentro da Comissão Internacional Eletrotécnica, ou IEC. O comitê produziu um documento detalhando os equipamentos e metodologias de medidas para determinar o potencial das emissões de EMI.

Em dois momentos na história houve avanços marcantes na compatibilidade, sendo o primeiro a publicação em 1979 de uma regulamentação que limitava as emissões eletromagnéticas provenientes de equipamentos eletroeletrônicos e sistemas digitais a níveis abaixo de limites pré-definidos pela *Federal Communications Commission* – FCC, nos Estados Unidos. O mais recente e talvez o mais importante avanço da compatibilidade eletromagnética se deu em 1989 com o surgimento da Diretiva Européia de EMC, que diz em linhas gerais que um equipamento a ser introduzido no mercado deve ser certificado como tendo imunidade mínima e níveis de emissão máxima de acordo com a norma, ou seja, deve ser compatível com o ambiente onde estará operando.

3.1.2. Conceitos e nomenclaturas importantes

Alguns conceitos e termos dentro do contexto da CEM são muito importantes e frequentemente utilizados em todos os assuntos da compatibilidade eletromagnética. A seguir apresentam-se alguns destes conceitos.

- Ambiente Eletromagnético: Conjunto de fenômenos eletromagnéticos existentes em um dado local.
- Compatibilidade eletromagnética (EMC ou CEM): Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético, sem introduzir perturbação eletromagnética intolerável em tudo que se encontre neste mesmo ambiente.
- Corrente de modo diferencial: Em um cabo de dois condutores, ou para dois condutores particulares em um cabo multicondutor, é a corrente que flui em sentidos opostos. O plano de referência de terra não está envolvido. Vide Figura 13.

- Corrente de modo comum: Em um cabo tendo mais de um condutor, incluindo blindagem onde houver, é a corrente que flui no mesmo sentido nos condutores, e geralmente através de capacitâncias parasitas, retorna pelo plano de referência de terra. Vide Figura 13
- Emissão (Eletromagnética): Fenômeno pelo qual a energia eletromagnética emana de uma fonte.
- Interferência eletromagnética (EMI): Degradação do desempenho de um equipamento, canal de comunicação ou sistema, causada por uma perturbação eletromagnética.
- Interferências inter-sistemas: EMI que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida por outro sistema.
- Interferências intra-sistema: EMI que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida internamente ao próprio sistema.
- Plano (de referência) de terra: Superfície condutora, plana, cujo potencial é utilizado como uma referência comum.
- Perturbação eletromagnética: Fenômeno eletromagnético capaz de degradar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou de afetar desfavoravelmente matéria viva ou inerte.
- Radiação (Eletromagnética): Fenômeno pelo qual a energia emana de uma fonte para o espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas.
- Ruído Eletromagnético: Fenômeno eletromagnético variável no tempo, aparentemente não possuindo informação e capaz de superpor-se a um sinal desejado ou ainda, combinar-se com o mesmo.
- Susceptibilidade: propensão de um equipamento ser influenciado por uma perturbação.

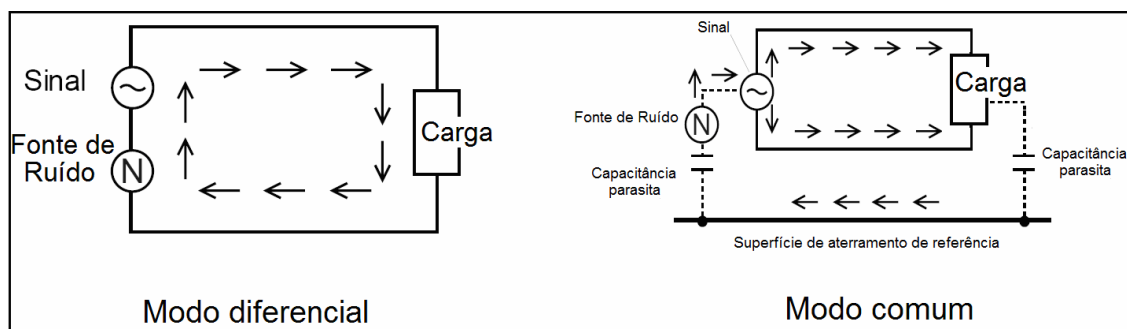


Figura 13 - Correntes de modo diferencial e comum

3.2. A INTERFERÊNCIA

Considerando dois equipamentos eletrônicos, os mesmos podem estar sofrendo algum tipo de acoplamento eletromagnético. Quando o efeito deste acoplamento é danoso para alguma das partes, diz-se que existe um fenômeno de interferência eletromagnética. Pode-se melhor entender este modelo simplificado, pela Figura 14.

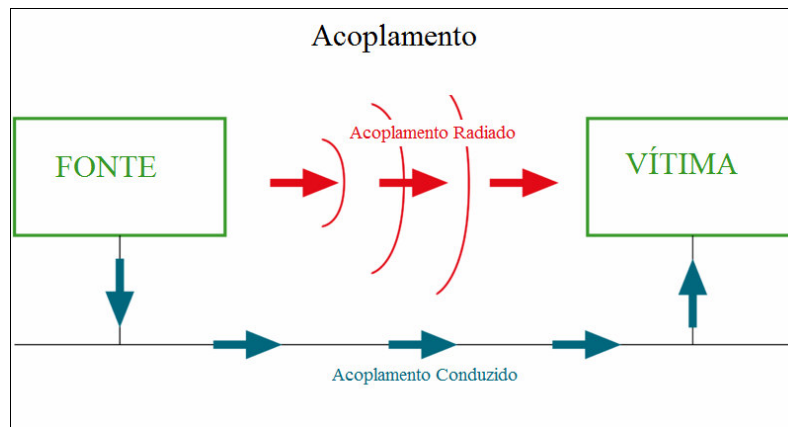


Figura 14 - Acoplamento Eletromagnético

A propagação dos campos interferentes pode acontecer por dois modos básicos: Conduzida, através de cabos de conexão, cabos de alimentação, trilhas, ou seja, qualquer meio condutor interligando a Fonte e o Receptor; ou Radiada, geralmente através de uma antena, intencional ou não, por onde a energia é emitida para o ar, e por propagação chegando ao receptor.

Os possíveis percursos por onde a Interferência Eletromagnética pode ser transmitida da sua Fonte até o Receptor são:

- Radiação direta da Fonte para o Receptor realizada pelo ar;
- Radiação direta da Fonte acoplada ao cabo de alimentação, sinal ou controle do Receptor;
- Radiação realizada pelo cabo de alimentação, sinal ou controle, este funcionando com uma antena não intencional, para o Receptor;
- Condução direta da Fonte para o Receptor via cabos e conexões em comum

As causas de um problema de EMI podem estar tanto dentro de um sistema, caso em que é chamado de problema intra-sistêmico, quanto fora, caso em que é chamado de problema inter-sistêmico.

3.3. NORMAS DE EMC

Com o aumento do número de equipamentos eletrônicos ao redor do globo, diversas agências tem trabalhado em diversas normas cercando o assunto da compatibilidade eletromagnética. Estas normas apresentam razões e limites de níveis de emissão eletromagnética para diferentes equipamentos. Assim sendo, estas normas impõem nos produtos requisitos adicionais além dos funcionais. Com isto, a tentativa é garantir que no ambiente eletromagnético de uso de todos os diversos equipamentos existentes de diversos fabricantes, funcionem de forma harmoniosa.

Há, basicamente, duas classes de normas que são usadas em sistemas elétricos e eletrônicos. As normas impostas pelas agências governamentais e as especificadas pelos fabricantes de equipamentos. As normas impostas pelas agências governamentais são legais e pode-se dizer obrigatórias. Elas servem como uma barreira à introdução de produtos não conformes em determinado mercado. No entanto, não existe uma garantia de que, por estar conforme as normas de EMC, o equipamento não estará sujeito a gerar ou receber EMI. Decorrente disto, os fabricantes de equipamentos, visando satisfazer seu consumidor através de equipamentos confiáveis e de qualidade, geram muitas vezes suas próprias diretivas, para garantir maiores níveis de imunidade e menores níveis de emissão.

Não existe um órgão de controle único com jurisdição sobre todos os sistemas, capaz de determinar as ações necessárias para se obter EMC. Geralmente, a EMC é obtida por associações industriais, regulamentação voluntária, regulamentação forçada pelos governos ou ainda, acordos negociados entre as partes envolvidas. É importante ser enfatizado que tais normas estão em constante estado de atualização devido ao aparecimento de novas aplicações e novas tecnologias. A alocação e distribuição de frequências para operação para os diversos tipos de equipamentos e tecnologias são vinculadas a acordos estabelecidos por tratados internacionais. Os regulamentos resultantes de tais acordos internacionais são publicados pela "*International Telecommunication Union*" (ITU).

Nos Estados Unidos o "*Federal Communication Commission*" (FCC) possui autoridade sobre as comunicações via rádio e via cabo. No Brasil, para equipamentos de telecomunicações, tal

função é exercida pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), através da Resolução nº 442, de 21 de julho de 2006. Fora as telecomunicações, no Brasil apenas a área médica é regulamentada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), através da Resolução nº 444 de 31 de Agosto de 1999. Existem planos de regulamentação de eletrodomésticos, mas estes ainda não estão em vigor.

No caso do segmento de refrigeração, nos países onde existe regulamentação, a norma aplicável de emissões eletromagnéticas conduzida ou radiada é a CISPR 14, que trata de eletrodomésticos e ferramentas elétricas em geral. Os procedimentos são especificados para a medição dos níveis das emissões eletromagnéticas geradas pelos equipamentos testados e os respectivos limites são impostos para a faixa de frequência que vai de 148.5kHz até 30MHz para emissões conduzida e de 30MHz a 300MHz para emissões radiadas.

3.4.A CISPR 14

No segmento de eletrodomésticos, inclusive os da linha branca, a Diretiva Européia adota a norma EN55014-1, que tem como equivalente a CISPR 14-1 [14]. Esta norma foi criada pelo sub-comitê CISPR/F, da CISPR, e seu escopo engloba basicamente eletrodomésticos que tem suas funções principais desempenhadas por motores e/ou dispositivos de chaveamento e regulação. Esta norma é fortemente ligada a outras normas do organismo, principalmente em quesitos comuns como o modo de realizar as medições apropriadas.

Os limites especificados desta norma, podem ser vistos na tabela e no gráfico abaixo.

Tabela 3 - Limites para Eletrodomésticos – CISPR14-1 [14]

Faixa de Frequencias	Nos terminais principais		Nos terminais de carga e terminais adicionais	
1	2	3	4	5
(MHz)	db (uV) Quasi-pico	db (uV) Média	db (uV) Quasi-pico	db (uV) Média
0,1485 a 0,5	Caindo linearmente com o logaritmo da frequência de: 66 a 56 59 a 46		80	70
0,5 a 5	56	46	74	64
5 a 30	60	50	74	64

Uma observação a ser feita é que apesar de na tabela e nos gráficos apresentados pela própria norma, a medição de emissões conduzidas efetivamente se inicia em 148,5kHz e não em 150kHz como pode ser visto acima.

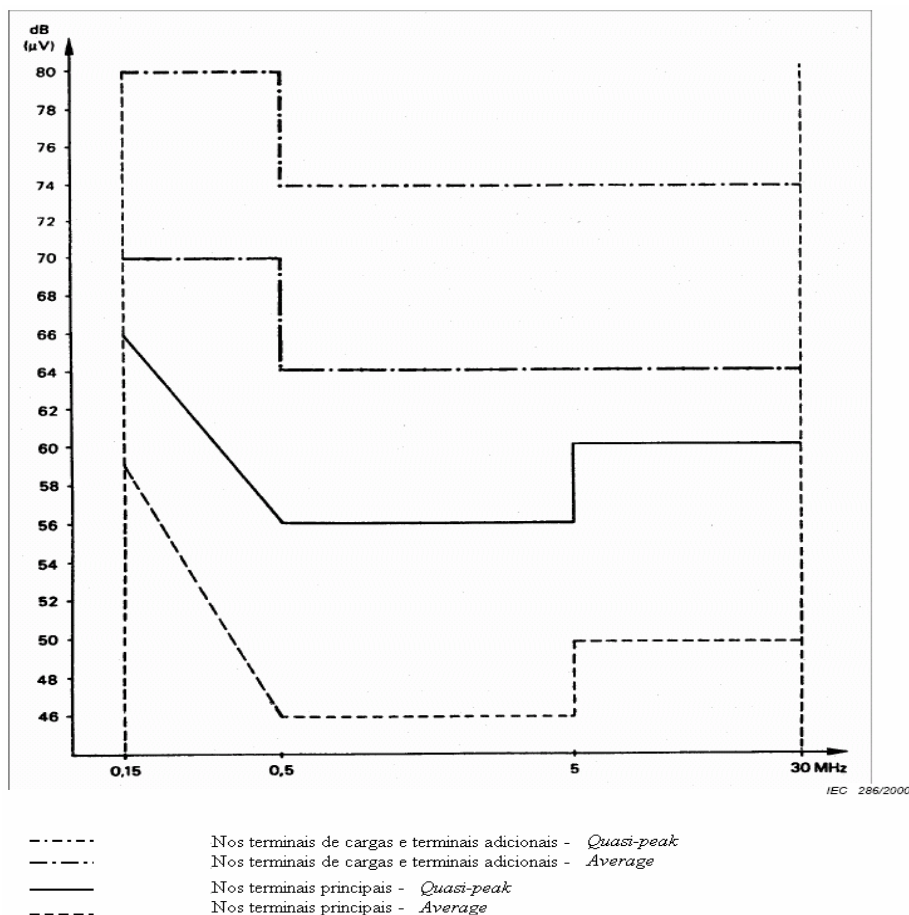


Figura 15 - Limites da Norma CISPR 14

As medidas de emissão conduzida são feitas em três categorias básicas: Média, Pico e Quasi-pico. O Pico (do inglês *peak*), como o próprio nome diz, mede o pico do sinal analisado. Geralmente denominado detector de envelope. Não é requerido nas normas CISPR, mas é utilizado para analisar o sinal inicialmente, antes de aplicar o detector de Quasi-pico, já que é uma medida mais rápida de ser executada. A Média (do inglês *average*) mede a média do sinal. Esta medida penaliza emissões contínuas comparadas com emissões pulsadas. O detector de Quasi-pico realiza uma medida de pico ponderada com tempos de carga e descarga especificados em norma. Como a CISPR historicamente protege as transmissões e a voz no espectro de radio, o uso deste detector é intenso.

A medição das grandezas representadas na norma [14] seguem detalhes especificados na CISPR 16-1 [15], que é uma norma mais generalista que fala de métodos de medição. As regras principais para a execução das medidas em eletrodomésticos que são normalmente operados sem conexão com o terra e não são portáteis são:

- EUT a 0,4 m acima de superfície condutora;
- EUT a 0.8 m de distância do AMN ou LISN;
- EUT a 0.8m de distância de outras superfícies condutoras;
- Superfície condutora de pelo menos 2x2m;

Para equipamentos que são operados normalmente no chão, ou que são muito pesados para serem operados na mão, mas ainda sem conexão com o terra:

- EUT posicionado acima da superfície condutora metálica de referência , sem contato, em suporte de 0,1m +- 25%;
- O cordão de alimentação deve descer verticalmente pela EUT, e depois seguir horizontalmente até o AMN ou LISN;
- O AMN ou LISN deve ser conectado à superfície condutora metálica de referência.
- A superfície condutora metálica de referência deve se estender pelo menos 0,5m fora das fronteiras do EUT.

Para eletrodomésticos que são normalmente operados com conexão com o terra:

- EUT a 0.8 m de distância do AMN ou LISN;
- Superfície condutora de pelo menos 2x2m;

Para equipamentos que ficam no chão e são aterrados (este sendo o caso de refrigeradores):

- EUT posicionado acima da superfície condutora metálica de referência , sem contato, em suporte de 0,1m +- 25%;
- O AMN ou LISN deve ser conectado à superfície condutora metálica de referência ;
- As fronteiras do EUT devem estar a pelo menos 0,4m de uma superfície vertical condutora, de pelo menos 2x2m

Os requisitos adotados para este trabalho foram o de equipamento que é utilizado normalmente no chão e aterrado.

3.5.MEDIÇÃO DE EMISSÕES

Um dos aspectos mais difíceis da compatibilidade eletromagnética é o conjunto de técnicas envolvidas na realização de medições. Para facilidade de medição e análise, considera-se que emissões radiadas predominam acima de 30MHz e emissões conduzidas predominam abaixo de 30MHz. Esta consideração de mudança de conduzida para radiada em uma dada frequência, não

é mágica. De acordo com WILLIAMS [16], comprimentos típicos de cabeamento tendem a ter ressonância em 30MHz, levando a medidas conduzidas anômalas. Por outro lado, medidas abaixo de 30MHz necessitam de medidas de campo próximo dependendo da distância da fonte emissora, cujos resultados não necessariamente se correlacionam com situações reais.

Para efetuar medições de radiação de energia eletromagnética na forma conduzida, são utilizados um de dois possíveis equipamentos: O AMN, do inglês *Artificial Mains Network*, ou o LISN, também do inglês, *Line Impedance Stabilizing Network*, para prover uma impedância definida em Radio Frequência no ponto de medição e para isolar o circuito testado de sinais de interferência indesejada da rede elétrica. O tipo mais comum de LISN é definida na norma CISPR 16-1 [15] e apresenta uma impedância equivalente de 50ohms em paralelo com 50uH de cada linha para o terra.

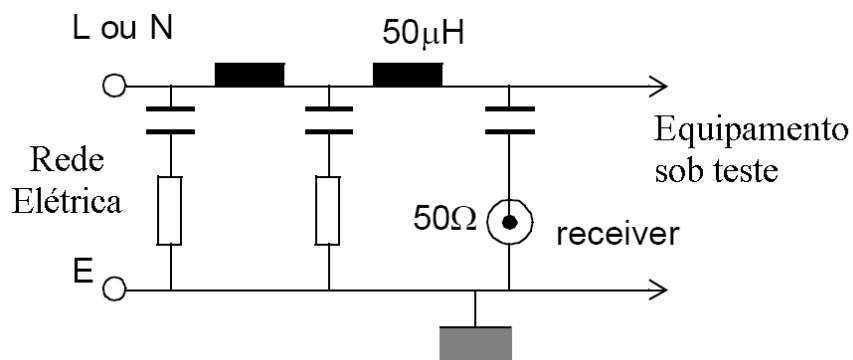


Figura 16 - Circuito LISN - CISPR16-1 50Ω /50μH

Os requisitos para efetuar os testes de emissões conduzidas são relativamente simples. O mais vital seria um plano de terra com pelo menos 2m x 2m de área, e 0.5m maior que as fronteiras externas do equipamento a ser testado. Nesse teste, o equipamento sobre teste, do inglês *EUT – Equipment Under Test*, deve ser colocado no centro do plano de terra, dependendo do equipamento, em cima de uma mesa não condutiva. Pode ser visto na figura a seguir um exemplo de disposição para execução dos ensaios.

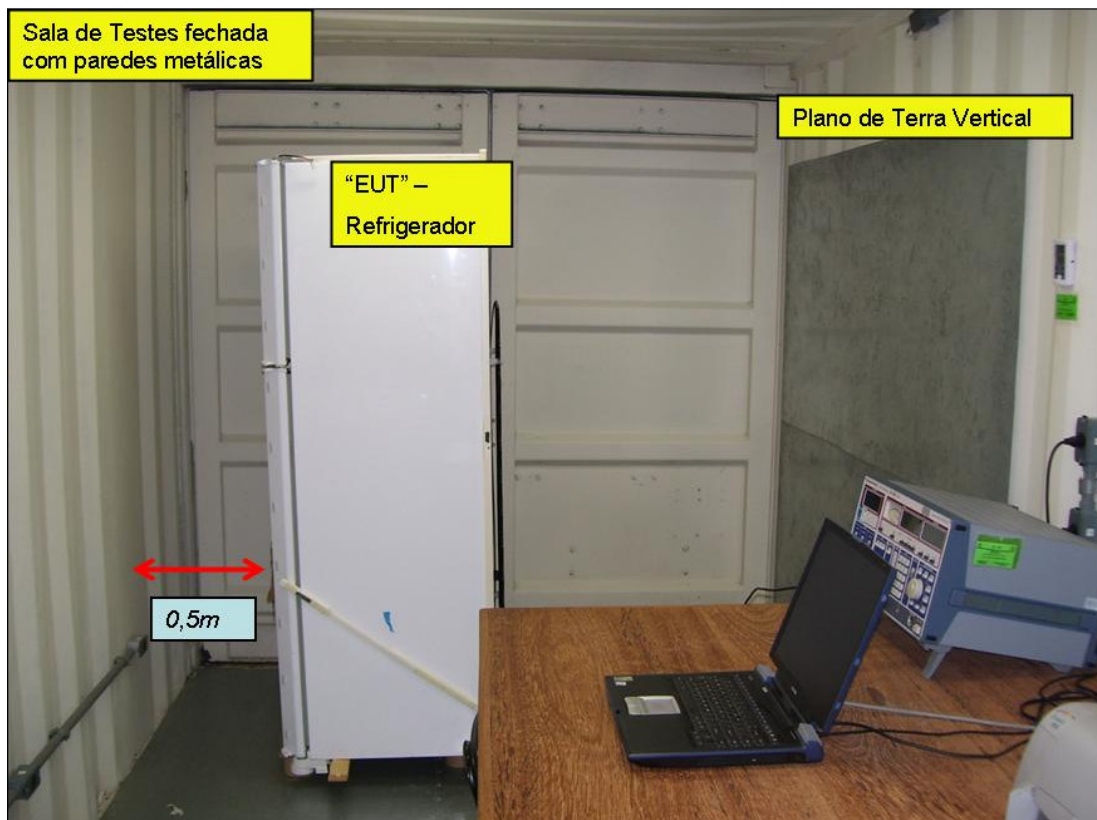


Figura 17 – Exemplo de algumas disposições para ensaio de emissões eletromagnéticas conduzidas

Nos ensaios, as LISNs são conectadas a um receptor de EMI. Este por sua vez é efetivamente o dispositivo que fará a medição do ruído emitido pelo equipamento sob teste. Atualmente também tem-se com parte de todo o conjunto de testes, microcomputadores que recebem os dados do receptor de EMI, e grava os mesmos para posterior análise.

Os requisitos de resultados positivos ou negativos da norma são especificados na forma de gráficos onde estes limites são colocados para cada frequência. A seguir é mostrado um comparativo entre um resultado desfavorável no teste e um resultado considerado favorável. É importante ressaltar novamente, que a aprovação ou reprovação no ensaio de compatibilidade é baseada não apenas em uma variável de resposta como apresentado no gráfico, mas como supracitado, nas variáveis Pico, Quasi-pico e Média do ruído conduzido medido.

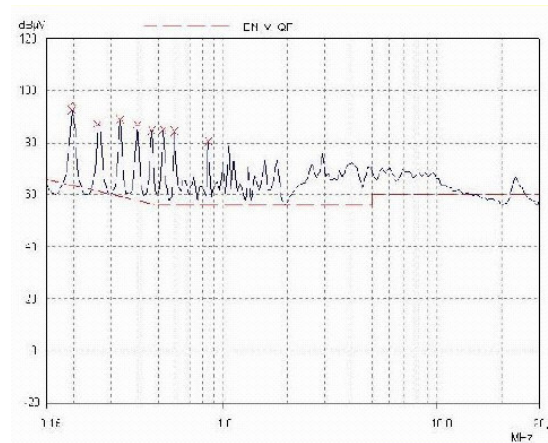


Figura 18 - Exemplo de ensaio com emissões acima do limite da norma (Quasi-pico apenas)

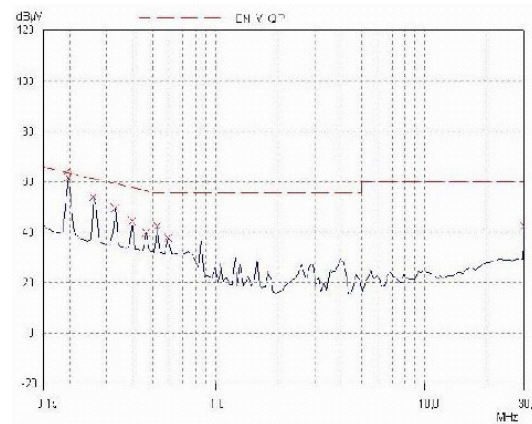


Figura 19 - Exemplo de ensaio com emissões abaixo do limite da norma (Quasi-pico apenas)

3.6. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram introduzidos fundamentos importantes de EMC, juntamente com conceitos básicos associados. A partir deste ponto, é possível iniciarmos, o que é o foco principal deste trabalho, o estudo de emissão de radiação na forma conduzida, proveniente de refrigeradores com controles eletrônicos nas redes de alimentação em baixa tensão residencial.

CAPÍTULO 4

MAPEAMENTO DO PROBLEMA INICIAL COM AS FERRAMENTAS SEIS SIGMA

Uma vez apresentadas as ferramentas Seis Sigma, a compatibilidade eletromagnética e as normas de interesse, os próximos passos serão um melhor entendimento do produto sob estudo a aplicação das ferramentas em si no problema. Descreve-se o problema da seguinte forma:

Entender a aplicação da metodologia Seis Sigma no campo da compatibilidade eletromagnética, utilizando no estudo um Refrigerador como equipamento a ser analisado. Através do uso da metodologia Seis Sigma, identificar e entender os fatores mais influentes nos resultados dos testes de emissão conduzida, de acordo com especificações da CISPR 14-1 [14] (exceto análise de Clicks). Sempre que possível, fatores externos ao controle devem ser estudados para aumentar o conhecimento do comportamento do produto sob este ensaio. Com esse conhecimento, ser capaz de otimizar o projeto de novos produtos, possivelmente trazendo ainda benefícios de redução dos retrabalhos em projetos, redução de custo, entre outros.

Desta forma o trabalho foi iniciado pela elaboração de um Mapa de Raciocínio, guia de todo o desenvolvimento. As perguntas iniciais do trabalho geraram os capítulos anteriores, onde o objetivo principal foi aprofundar o conhecimento nos quesitos de ferramentas Seis Sigma e as normas e medições de emissões conduzidas, objeto do estudo, além de guiar o presente capítulo através de um melhor entendimento do refrigerador em si.

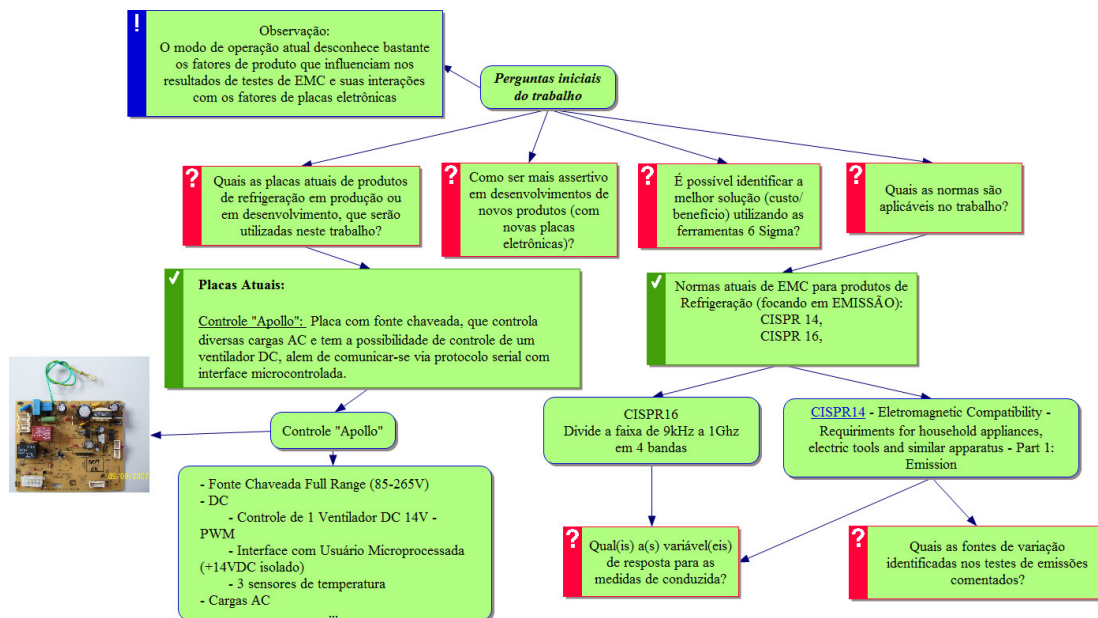


Figura 20 - Mapa de Raciocínio Inicial que mostra as primeiras perguntas geradas e caminhos escolhidos

Na Figura 20 pode-se visualizar o mapa em sua forma inicial, com as perguntas que guiaram o trabalho. Na parte inferior do mesmo, são visíveis os questionamentos relacionados a variável de resposta, objeto da próxima seção.

4.1. AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA – “Y”

Uma das perguntas chave iniciais a ser desenvolvida foi a escolha da variável de resposta a ser utilizada nas análises. As normas aplicáveis mostram que, nos ensaios de emissão conduzida, a variável de resposta é medida em $\text{dB}\mu\text{V}$, e se estende por uma faixa contínua de frequências, no nosso caso, de 148,5kHz a 30MHz (emissões conduzidas). De fato, a variável de resposta não é uma apenas, ou seja discreta, mas uma variável contínua, que na realidade é amostrada em passos discretos de frequência, gerando assim várias medidas individuais que são utilizadas na geração dos gráficos. Nos procedimentos de ensaios de compatibilidade, intervalos pequenos de medição são escolhidos de forma a capturar todos os distúrbios possíveis. Como é sabido, para a utilização de ferramentas estatísticas, não se pode utilizar um gráfico como variável de resposta quantitativa (apenas talvez como uma variável qualitativa). Assim sendo, optou-se por, a partir de um estudo de todo o espectro, escolher algumas “sub-variáveis” de resposta, que permitissem a aplicação das

ferramentas, de forma a responder a maioria das perguntas de forma satisfatória, sem a necessidade de estudar uma infinidade de variáveis de resposta.

As medidas de emissão conduzida são feitas em três categorias básicas, conforme já previamente mencionado: Média, Pico e Quasi-pico. Estas medidas seriam então aplicadas como variáveis de resposta básicas nos experimentos.

Com base no conhecimento das medições, optou-se por dividir o espectro de frequências em algumas faixas, ou seções, e realizar algumas operações matemáticas para obter um número pequeno de variáveis de resposta apropriadas. Uma vez dividido o espectro de frequências do teste, optou-se por buscar duas grandes respostas da faixa, sendo estas o Valor Médio e o Valor Máximo da mesma. Para poder decidir quantas e quais seriam as faixas sob estudo, um teste empírico inicial foi feito com o produto sob estudo, estando este em sua condição original, sem filtros ou modificações de qualquer natureza.

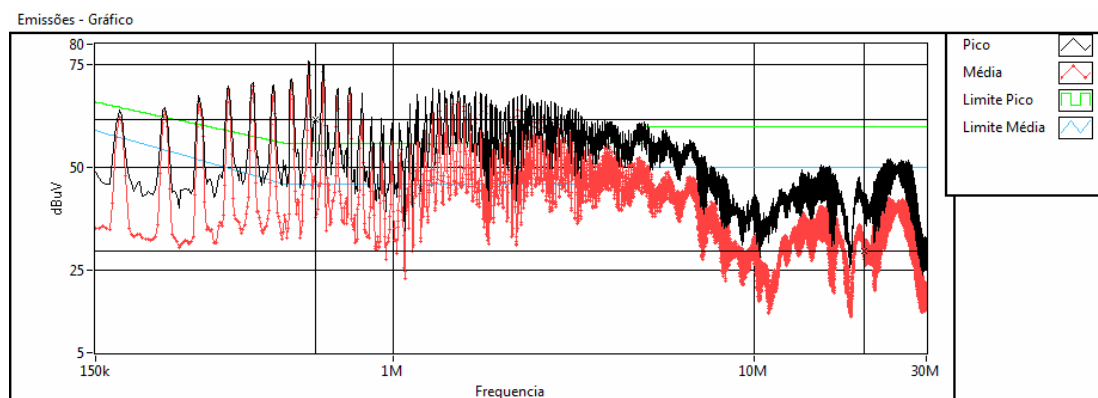


Figura 21 - Resultado de teste de Emissão Conduzida, no produto básico sem filtros

Com o resultado obtido e que pode ser visto observando o espectro mostrado na Figura 21, a opção foi de dividir a faixa de 148,5kHz a 30MHz em 3 faixas de interesses, de forma a observar o comportamento do produto no que foi chamado de “Baixas” frequências, “Médias” frequências e “Altas” frequências. Com isto, 12 variáveis de resposta foram escolhidas, sendo 6 para a medição utilizando o detector de Pico, e outras 6 utilizando o detector de Média. Abaixo são mostradas as variáveis para o detector de pico apenas:

- Valor Médio (Y1.1) e Valor Máximo (Y1.2) da faixa 1
- Valor Médio (Y2.1) e Valor Máximo (Y2.2) da faixa 2
- Valor Médio (Y3.1) e Valor Máximo (Y3.2) da faixa 3

Mesmo com as definições acima, ainda restava saber se as faixas escolhidas, juntamente com a escolha das variáveis de resposta, eram adequadas. A opção adotada foi a de, durante o primeiro experimento, executar uma avaliação do sistema de medição (MSE), com a utilização de Cartas de Controle. As cartas poderiam dizer quais variáveis de resposta seriam apropriadas aos estudos e quais não, nos quesitos de discriminação, repetitividade e estabilidade, já considerando a influência do produto sob estudo, e também considerando ruídos de medições e ruídos produtivos com o uso de diferentes placas eletrônicas.

O uso da ferramenta de MSE exige que se conheçam as fontes de variação em potencial em dada situação, para garantir sua inclusão no experimento, e garantir as corretas conclusões das respostas obtidas. Um mapeamento inicial das mesmas foi feito com foco no produto, onde foram identificadas, como principais fontes de variação, os controles eletrônicos, além das cargas elétricas de corrente contínua. Para identificar as outras potenciais fontes de variação, o estudo do documento LAB34 [17] mostrou fontes como atenuação entre LISN e receptor, impedância da LISN, erro do passo de frequência entre outros.

Com uma explicação mais simples porém objetiva, o documento da Schaffner [18] mostra que no que diz respeito a incerteza da medição em compatibilidade eletromagnética, utiliza-se uma combinação de dois tipos de incerteza, chamadas de tipo A e tipo B, que geram uma incerteza final chamada de expandida. A incerteza do tipo A é avaliada através da análise estatística de uma série de observações, enquanto a incerteza do tipo B é determinada por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações, como por exemplo, manuais de fabricantes ou certificados de calibração. No laboratório MagLab, a incerteza expandida para os ensaios de emissão conduzida calculada foi de 4,31dB [19] considerando a contribuição de ambos os tipos de incerteza. Vale ressaltar no entanto, que a medição da incerteza tipo A por NYLAND et al. [19] considerou um EUT padrão e uma frequência fixa de medição.

De forma geral, a utilização da ferramenta MSE não tem como objetivo substituir a avaliação recomendada pelos documentos supracitados. No entanto, considerando-se que será aplicada uma transformação matemática nos dados, e que durante o estudo é possível considerar a contribuição do EUT (conforme comentado acima no procedimento executado por NYLAND et al. [19] utiliza-se um EUT padrão), o MSE pode fornecer informações no que diz respeito principalmente a variação dos dados, ou, fazendo uma analogia com Schaffner [18], informação da incerteza tipo A. Ou seja, ao final dos experimentos, a escolha de aprovação perante norma ou não, será feita com a incerteza calculada do laboratório total, mas durante os experimentos, a escolha das variáveis seguirá as recomendações do MSE.

4.2. BUSCA DOS FATORES A SEREM ESTUDADOS NO REFRIGERADOR – “X”

A etapa lógica subsequente a definição do que deseja-se medir, é a busca pelos fatores, ou fontes de variação, que podem estar influenciando as variáveis de resposta positiva ou negativamente, através dos conhecimentos de engenharia. A ferramenta utilizada para encorajar o raciocínio crítico, estimular o pensamento $Y=f(x)$ e que ajuda a focar os esforços, é o Mapa de Produto. Com este, o engenheiro é forçado a documentar o que sabe sobre o produto (ou pensa que sabe), fazendo isto em uma seqüência lógica que permite a identificação dos fatores que devem ser estudados. Esta etapa exige conhecimento do produto que se deseja estudar.

A implementação das ferramentas de Seis Sigma foi feita em um refrigerador Brastemp® da empresa Whirlpool S.A. ®. O refrigerador escolhido é do tipo *No-Frost*, o que quer dizer que conta com um sistema de degelo automático do evaporador, evitando assim que o consumidor tenha que descongelar manualmente o seu produto. A escolha foi feita devido a maior complexidade eletrônica que estes aparelhos possuem em comparação com similares, provendo assim maiores oportunidades de aprendizado.

Além disso, um fator que levou a escolha deste tipo de produto é a própria história do segmento de refrigeração, no que diz respeito à presença de controles eletrônicos nos produtos. Desde o surgimento da refrigeração comercial a compressão, este mercado sempre foi inerentemente um mercado eletro-mecânico, onde a maioria das funções sempre são desempenhadas por termostatos e chaves, entre outros componentes elétricos. Ou seja, quesitos como emissões de radiação eletromagnética conduzida ou radiada não estavam na pauta das empresas do ramo. A eletrônica passou a integrar estes produtos recentemente, há pouco mais de uma década e meia, criando oportunidades de estudos e melhorias dos novos produtos, uma vez que circuitos chaveados, *clocks*, entre outros, chegaram para trazer inúmeros benefícios, mas também novos desafios no quesito de compatibilidade eletromagnética.

O produto possui 2 portas, onde o compartimento superior é o Congelador, com um ventilador de corrente alternada e sensores de temperatura NTC (*Negative Temperature Coefficient*, resistores que variam negativamente com a temperatura), e o compartimento inferior é o Refrigerador, que conta com sensor de temperatura e opcionalmente um ventilador de corrente contínua, nas versões do produto de maior valor de mercado. Além disso, o produto conta com uma resistência de degelo, lâmpadas e o compressor; todos componentes de corrente alternada. O

produto possui também com duas placas eletrônicas, uma para controle das cargas do produto, e outra para interação com o consumidor.



Figura 22 - Refrigerador No-Frost Brastemp BRM47

4.2.1. Os Controles Eletrônicos

A placa eletrônica de interação com o consumidor se chama placa de interface com o usuário, e aqui será nomeada de placa “Pegasus” (nome inscrito na própria placa). Nesta placa existem chaves e LED’s que recebem comandos do usuário e mostram o estado de certas funções especiais. Além disso, esta placa mostra um relógio com componentes de 7 segmentos (LED’s). Esta placa não possui uma fonte de alimentação, mas recebe uma tensão contínua de 14 Volts da placa de controle principal. Ela possui um microcontrolador, com *clock* interno, responsável por gerenciar as funções da placa, como a leitura das chaves, e a multiplexação dos LED’s. A mesma se encontra localizada na porta do congelador (superior), em um alojamento plástico. Recebe tensão e dados através de fiação que passa junto a dobradiça do produto, e desce até o controle principal.

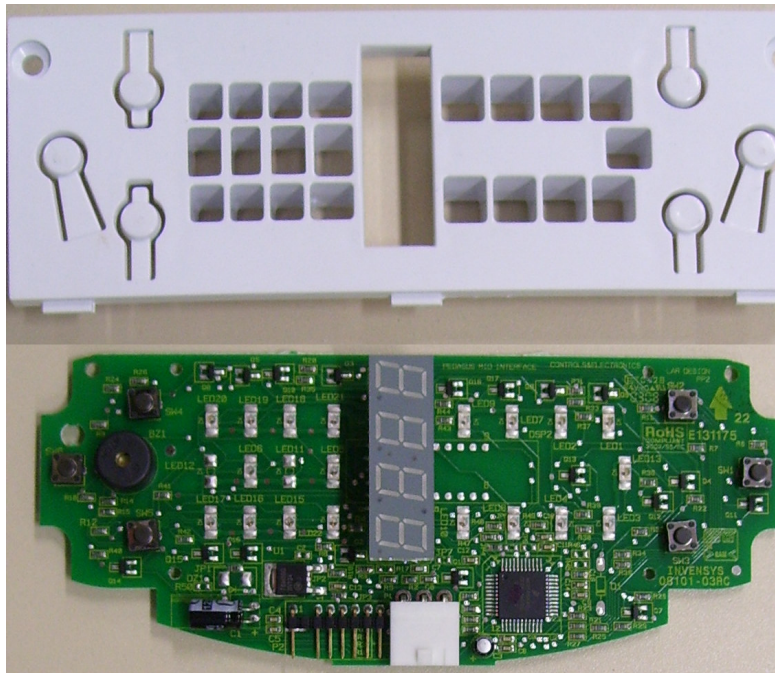


Figura 23 - Placa Pegasus - Interface com o Usuário

A placa de controle do produto é o coração do mesmo e será nomeada de “Apollo”. A placa conta com uma fonte de alimentação chaveada, que provê alimentação para a placa de interface, bem como para si mesma, para alimentar um microcontrolador e seus acionadores (relés na sua maioria). A fonte provê 3 saídas, sendo uma delas +14 Volts isolados, outras duas saídas não isoladas de + 5 Volts e -14 Volts. Esta placa eletrônica se localiza no pé do produto, na região chamada de nicho do compressor, e se encontra em alojamento plástico adequado a suportar partes vivas como as presentes nessa placa. A caixa que suporta esta placa, conforme mencionado acima, é plástica, por motivos de menor custo produtivo.

Os duas placas eletrônicas supracitadas se comunicam via protocolo proprietário da empresa. Este protocolo é serial e assíncrono, e utiliza apenas um condutor para este fim. Isto faz com que a conexão entre as duas placas seja de apenas 3 fios, sendo eles +14 Volts, sinal de dados e comum. O protocolo conta com técnicas de *software* para garantir uma maior integridade dos dados, em caso de interferências no sinal de comunicação.

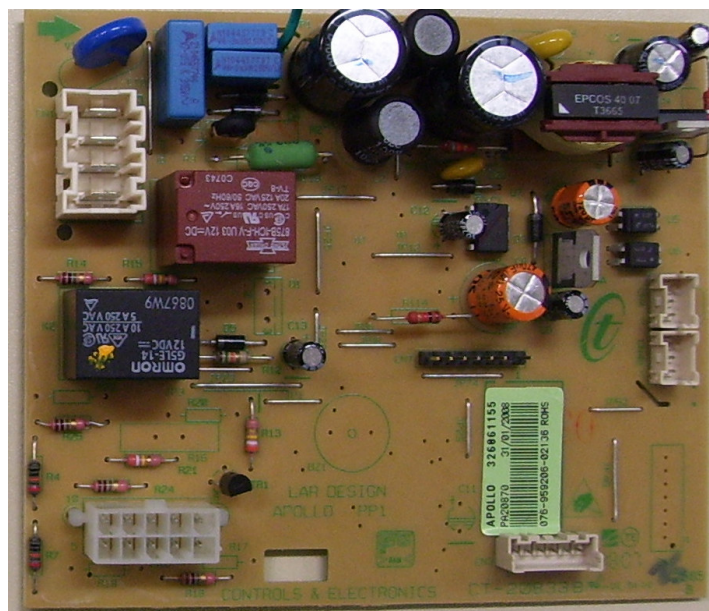


Figura 24 - Placa Apollo - Controle de cargas do produto

Durante o trabalho de desenvolvimento do controle, em estágio avançado de desenvolvimento, foram constatados alguns problemas nos ensaios de compatibilidade eletromagnética, no quesito de Emissão Conduzida. A princípio a placa “Apollo”, quanto ao filtro de entrada, conta com a possibilidade de implementação de um capacitor X, dois indutores nas linhas de alimentação, e um conjunto de capacitores Y com conexão para o aterramento do produto, como soluções para reduzir o ruído conduzido principalmente, além de um varistor na entrada para proteção contra surtos. Esta configuração não se mostrou suficiente para enquadrar o produto nas suas normas vigentes, da CISPR 14 [14]. Devido aos requisitos vigentes de segurança elétrica, e devido a quantidade de funções do controle, não foi possível adicionar nenhum outro filtro no próprio controle, principalmente por uma questão de espaço físico disponível.

Uma das restrições principais deste trabalho é executar o estudo de soluções que não demandem mudança de *layout* da placa eletrônica. Como requisito de entrada, foi decidido evitar alterar o projeto da fonte chaveada, mesmo sabendo que esta é provavelmente a geradora do ruído conduzido, e nela se encontrem grandes oportunidades de redução do mesmo, por conter os principais elementos chaveadores. O foco no que diz respeito a eletrônica do produto foi trabalhar com componentes de filtragem. Uma opção possível mas não tão desejada por motivos econômicos é a adição de um filtro de linha externo, com outros elementos de filtragem se necessário. Na Empresa Whirlpool®, tal abordagem de adicionar um filtro separado do controle eletrônico principal, já foi utilizada com sucesso em projetos passados (produto introduzido no mercado em 2003).

Ainda falando do controle principal, a fonte chaveada é controlada por um componente único que engloba todas as funções de comando e chaveamento da fonte, sendo este componente o VIPer32 da empresa ST®. Este componente conta com um chaveamento fixo em 60kHz, e controle realimentado da saída em corrente. Um diagrama elétrico da fonte chaveada do controle pode ser encontrada na Figura 25, apenas para referência.

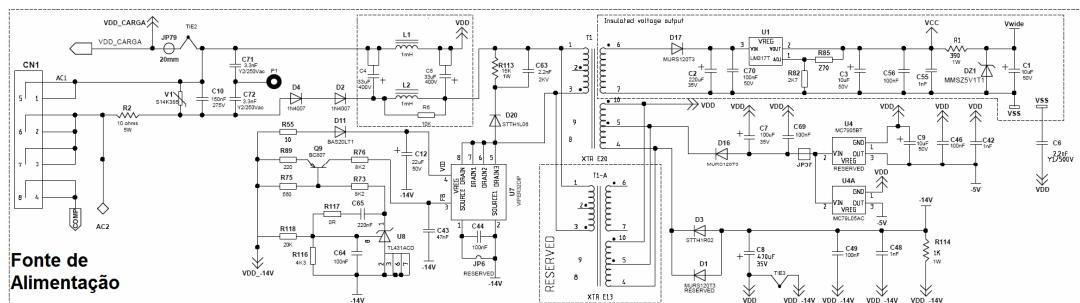


Figura 25 – Diagrama elétrico básico da Fonte de Alimentação da Placa Apollo

4.2.2. O Refrigerador

É importante ressaltar que os produtos de refrigeração, há algum tempo, utilizam Poliuretano como material de isolamento térmico. Assim sendo, o produto é feito de uma chapa metálica externa, uma caixa plástica interna, e entre os dois, Poliuretano. Geralmente na parte de trás do produto outro material (papelão por exemplo) é utilizado. A fiação da maioria dos produtos é fixada na capa metálica externa pelo lado de dentro por facilidade de montagem, e levada aos orifícios adequados na caixa interna geralmente, para as respectivas conexões.

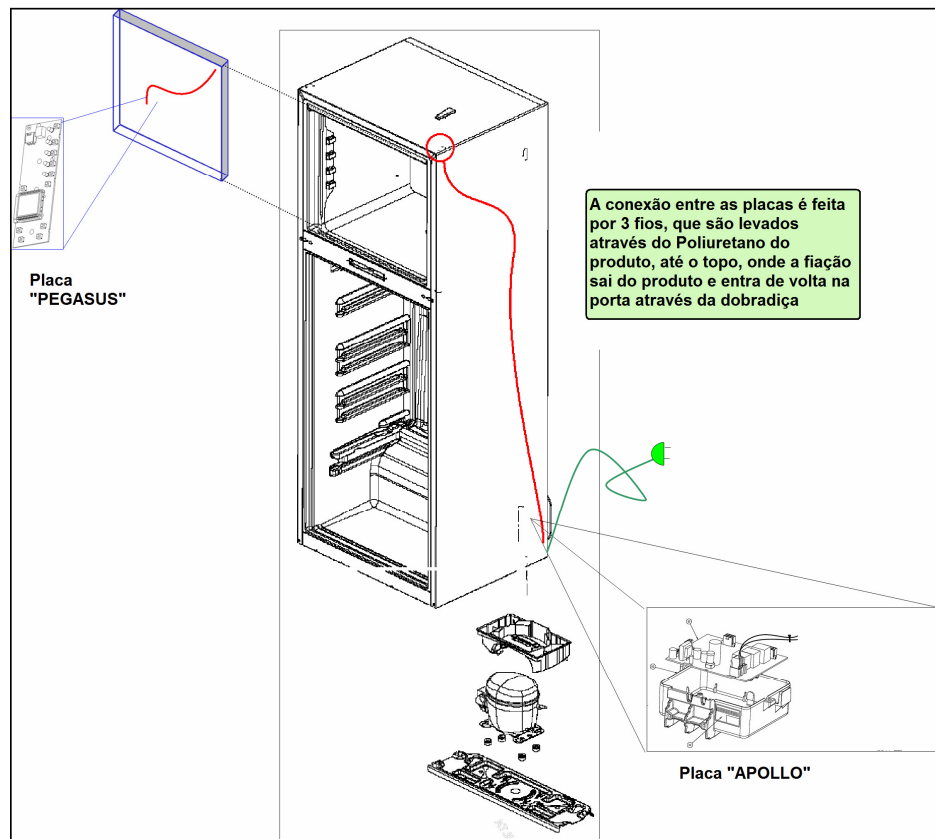


Figura 26 - Placas eletrônicas dentro do produto

O cordão de alimentação do produto é conectado diretamente no controle eletrônico “Apollo”, que distribui a potência a cada uma das cargas de acordo com rotina de software embarcado, e seus respectivos acionadores. Por falta de uma mais clara regulamentação brasileira, o produto não possui um cordão Tripolar, mas possui um fio separado conectado a carcaça para permitir o aterramento pelo usuário, sendo então categorizado como produto com aterramento.

4.2.3. Mapas de Produto

Com a base estabelecida, pode-se então prosseguir com a busca de soluções para reduzir a emissão do produto, enquadrando-o na norma.

A execução do Mapa de Produto inicial, buscou no produto Refrigerador os seus fatores iniciais. Como era de se esperar, um dos componentes que é o Controle Eletrônico Apollo exigiu

um Mapa de Produto específico, onde baseado no circuito eletrônico, checkou-se os fatores internos ao controle que estão intimamente relacionados ao ruído conduzido.

O Mapa de Produto em detalhes pode ser visto no Anexo 2 – Mapa de Produto do refrigerador e no Anexo 3 – Mapa de Produto da fonte de alimentação. Dos mapas, diversos fatores foram identificados, e através de raciocínio crítico e de uma avaliação de restrições experimentais, alguns fatores foram identificados para serem utilizados no primeiro experimento. Foram eles:

A = Capacitor C10 (filtra ruído diferencial)

B = Filtro de modo comum (Y ou Indutor modo comum)

C = Indutores L1 e L2 (ruído de modo diferencial)

D = Comprimento da fiação da Interface de Usuário "Pegasus"

E = Roteamento do cabo de alimentação ao chegar e conectar-se a placa Apollo

F = Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação não isolada

G = Disposição da rede elétrica dentro da caixa do controle Apollo

H = Trançamento do cordão de alimentação

A escolha desses fatores seguiu três linhas de raciocínio, sendo estas:

- Quais fatores relativos ao refrigerador como produto podem ser significativos;
- Quais fatores do controle eletrônico (que não da fonte de alimentação em si) podem ser significativos;
- Facilidade de execução também foi levada em consideração.

O Mapa de Produto não é uma ferramenta estática, mas dinâmica. A medida que se conhece mais sobre o produto, e novo conhecimento é obtido, este pode ser adicionado. Nas etapas posteriores a execução do experimento, novos fatores foram identificados, e serão comentados no momento oportuno.

4.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

Conforme comentado, a placa “Apollo” suporta adição de filtro se necessário para a aprovação perante a norma apropriada de Compatibilidade Eletromagnética. Assim sendo, como o objetivo do estudo é entender quais medidas são efetivas no produto sob análise para reduzir o ruído conduzido, um estudo preliminar foi realizado, com as configurações padrão do produto, sem a adição de qualquer filtro na placa.

Os testes foram executados de acordo com o arranjo de ensaios requerido pela norma CISPR 14 [14], e cuja execução no laboratório MagLab estão melhor apresentados no Anexo 1 – Arranjo dos ensaios. O produto foi mantido com o sistema de refrigeração ativo, também como requerido pela norma, e nenhuma modificação em sua condição atual de produção foi provocada. Nenhum dos filtros opcionais do controle Apollo foi adicionado no controle.

O resultado foi um produto que, em boa parte do espectro analisado de 148,5kHz a 30MHz, está acima do limite da norma, como pode ser visto na Figura 21 - Resultado de teste de Emissão Conduzida, no produto básico sem filtros.

Foram executadas duas rodadas de ensaios, para já obter alguma idéia de variação de medida para medida, através da observação da diferença das medidas feitas. Os resultados das medidas médias e máximas nas faixas escolhidas podem ser vistas na Tabela 4 – Resultados para o detector de Média e na Tabela 5 – Resultados para o detector de Pico. Maiores detalhes do significado destas medidas podem ser encontrados no Capítulo 5 - Resultados experimentais utilizando seis sigma . Os resultados são apresentados em $\text{dB}\mu\text{V}$.

Tabela 4 – Resultados para o detector de Média

Dissertação de Mestrado						
Aluno:	João E. S. Borges					
				Faixas		
					1	2
Nome do Teste:	Baseline - AVR3					
Data do Teste:	18/03/2008 18:40			Frequência Inicial (MHz)		
Descrição:				Frequência Inicial (MHz)		
Arquivo	Media 1	Média 2	Media 3	Max 1	Max 2	Max 3
BLINE1.DAT	46,676	41,7405	32,253	74,95	64,02	42,42
BLINE2.DAT	48,313	42,7378	32,587	77,36	65,49	42,53
Média dos ensaios	47,495	42,2391	32,42	76,15	64,75	42,475
Desvio padrão	1,1569	0,7052	0,2358	1,704	1,039	0,07778

Tabela 5 – Resultados para o detector de Pico

Dissertação de Mestrado										
Aluno:	João E. S. Borges									
					Faixas		1	2	3	
Nome do Teste:	Baseline - PICO									
Data do Teste:	18/03/2008 22:39						Frequência Inicial (MHz)	0,15	2	10
Descrição:							Frequência Inicial (MHz)	2	10	30
Arquivo	Media 1	Média 2	Media 3	Max 1	Max 2	Max 3				
BLINE1.DAT	56,908	51,566	42,4268	76,03	67,72	52,189999				
BLINE2.DAT	58,065	52,595	42,6851	78,32	68,75	52,459999				
Média	57,487	52,081	42,5559	77,17	68,24	52,324999				
Desvio padrao	0.8179	0.7277	0.18266	1.619	0.728	0.1909188				

4.4. CONCLUSÃO

Como parte extremamente importante do trabalho de qualquer usuário das ferramentas Seis Sigma, uma análise detalhada inicial do problema utilizando o máximo de conceitos de engenharia, conhecimento do produto e raciocínio crítico é fator determinante de sucesso na obtenção de soluções adequadas e precisas. No caso do presente trabalho, conhecer o produto refrigerador incluindo os componentes elétricos e eletrônicos, é imprescindível na determinação de onde e como executar os experimentos.

Um desafio em particular até este ponto, foi a determinação das variáveis de resposta. A escolha da variável a ser medida, ou Y, pode ser decisiva em vários projetos. Isto quer dizer que mesmo que as variáveis aqui escolhidas tenham servido ao intento do trabalho, em projetos específicos, com problemas peculiares, estas mesmas variáveis podem necessitar ser revisitadas para garantir um caminho adequado a ser seguido.

No próximo capítulo, o conhecimento adquirido das variáveis de resposta, bem como dos fatores de produto a serem estudados, geraram o caminho a ser seguido experimentalmente, na busca de uma melhor condição do produto perante a norma de compatibilidade utilizada.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO SEIS SIGMA

Com o problema inicial mapeado, variáveis de resposta definidas e fatores de produto a serem testados, o próximo passo lógico é a execução de experimentos que busquem responder aos questionamentos gerados.

Vale ressaltar que planejamento é tão importante quanto (ou mais) que os resultados e análises posteriores em si. Para ajudar na organização das idéias e perguntas que desejam ser respondidas, manter um formulário de planejamento de experimentos é essencial para manter claro o objetivo do teste, histórico e outras informações importantes. No Anexo 4 – Planejamento dos DOEs podem ser encontrados os formulários de planejamento de todos os experimentos realizados durante este trabalho. Estes formulários são conhecidos no meio Seis Sigma e foi apresentado por MOEM et al. [24]

5.1. O PRIMEIRO EXPERIMENTO – DOE 1

Com os fatores de interesse definidos, a decisão pela estratégia experimental a ser aplicada no primeiro teste teve que ser definida. Na elaboração de um plano para um experimento Fatorial, uma das perguntas iniciais é a quantidade de tempo para a execução do experimento. No caso o tempo para execução do experimento é relacionado principalmente a quantidade de rodadas (*runs*) ou tratamentos que serão executados. Dentro das perguntas que devem ser respondidas na elaboração do plano experimental, cabe citar:

- Qual a estratégia experimental a ser usada?
- Em quantos níveis os fatores serão ensaiados?
- Quantas rodadas (ou *runs*) pode-se executar?
- Qual a estratégia experimental de tratamento de ruído será adotada?
- Quais as restrições à randomização estarão presentes?

Com a presença de 8 fatores, e um desejo de reduzir a quantidade de ensaios no início do estudo, a escolha pela técnica de fatorial fracionado era clara. Conforme já mencionado, o uso de fatoriais fracionados é muito bem vindo em estudos exploratórios, onde vários fatores serão analisados em busca de quais (se algum) fatores são ativos. Este se baseia no princípio da esparsidade principalmente, onde espera-se que poucos sejam os fatores efetivamente significativos para a variável de resposta escolhida.

Com as colocações de BISGAARD [20], a escolha de 2 níveis por fator, caracterizando um experimento do tipo 2^{k-p} , também é uma escolha simples. Conforme colocado [20], o uso de três ou mais níveis para um fator, em experimentos industriais, normalmente não é muito proveitoso, visto que a utilização de experimentos subsequentes consegue fornecer mais respostas com menos experimentos.

Quanto a quantidade de experimentos a executar, é prática regular na execução de DOEs, verificar se a execução de 16 tratamentos é adequada. Este número de tratamentos é muito interessante, pois é um tipo de experimento mais robusto a causas especiais que o de 8 tratamentos, mas não gera tantos ensaios como o de 32 tratamentos. Além disso, quando se trabalha com experimentos fatoriais fracionados, é provado [21] que, para um experimento com 8 tratamentos, a variação substancial exibida nos gráficos de probabilidade normal torna difícil tanto identificar os fatores ativos quanto não escolher fatores inativos incorretamente. Consequentemente, um experimento com maior número de rodadas é recomendado. A decisão, no entanto, de quantos tratamentos serão executados, ainda leva em conta qual a resolução desejada do experimento. A resolução de um fatorial fracionado basicamente conta quais serão os fatores confundidos no experimento. Isto se dá, pois na geração da matriz do experimento fatorial fracionado, fatores de mais alta ordem são utilizados para estimar a árvore experimental de fatores localizados na base da árvore de amostragem. Isto quer dizer que um fator é dito confundido, se a sua matriz experimental é igual a de outro fator (ou interação), não sendo assim possível determinar qual dos dois é efetivamente o fator ativo.

Uma análise inicial, determinando que a execução de 16 tratamentos é adequada, a fração do fatorial fracionado pode ser determinada, e consequentemente sua resolução. Com 8 fatores e 16 tratamentos, o experimento pode ser representado como:

$$2_{IV}^{8-4} \quad (5-1)$$

Este experimento conta com uma resolução IV. Como se pode verificar em MONTGOMERY [22], um experimento de resolução IV não contém confundimento de fatores

principais (1ª ordem) com outros fatores principais, ou interações de 2ª ordem. Já interações de 2ª ordem podem estar confundidas com outras interações de 2ª ordem. Esta resolução é apropriada para o primeiro experimento, uma vez que os fatores principais não se confundem com nenhum outro fator.

Conforme comentado na seção 4.2, no primeiro experimento também deseja-se fazer uma avaliação simples do sistema de medição, com o intuito principal de validar as variáveis de resposta escolhidas. Assim sendo, foi decidido adotar a execução de duas medições por tratamento. Com isto, o primeiro experimento fica definido em 32 ensaios de emissão conduzida.

Na avaliação de estratégia experimental, conforme citado, leva-se em consideração a robustez do ensaio a causas especiais, numero de tratamentos e resolução. Outro ponto que não pode ser deixado de lado é o custo do experimento. No caso presente, o prazo do estudo permitiu a execução da quantidade de experimentos mencionada. Algo mais a ser levado em consideração na determinação do experimento são as restrições experimentais.

5.1.1. Restrições à Randomização – DOE 1

Com as definições do experimento claras, é necessário uma verificação das restrições do experimento. Em análises estatísticas, através da randomização, assume-se estar utilizando variáveis aleatórias independentes normalmente. Quando está discutindo a randomização, MONTGOMERY [22] diz que “Por randomização nós queremos dizer que tanto a alocação de material experimental como a ordem na qual as rodadas individuais...devem ser executadas são determinadas aleatoriamente.” O material experimental a que ele se refere, é chamado por BERGERUD (1996 apud SANDERS e COLEMAN , 2003 [23]) de estrutura da unidade. A estrutura da unidade é a divisão física do material experimental com base na realidade do experimento realizado.

Uma ferramenta gráfica que permite o correto tratamento das restrições à randomização, é o **FRD**, ou *Factor Relationship Diagram* (Diagrama de relacionamento de fatores). Esta ferramenta é discutida por SANDERS e COLEMAN [23], e auxilia os engenheiros no reconhecimento das restrições na randomização e orienta o desenvolvimento de perguntas que encorajem o investigador a entender as fontes de variação que podem contribuir para a falta de precisão em um experimento restrito ou para a falta de repetitividade num outro espaço de inferência. O FRD mostra detalhes do experimento, incluindo os fatores manipulados e não manipulados (que no caso são as fontes de variação, como as identificadas na seção 4.1). No FRD, representa-se a estrutura da unidade (ou fontes de variação não manipuladas), a estrutura do experimento e em consequência delinea-se o

espaço de inferência (condições onde se espera que os resultados do experimento sejam validos). O FRD é executado de acordo com a legenda abaixo:

- Preto** - Fatores (estrutura do experimento)
- Vermelho** - Ruídos não manipulados no experimento (estrutura da unidade)
- Alocação de material experimental (peças físicas)
 - Efeitos temporais (ordem de execução)
- Verde** - Linha de restrição
- Restrição temporal
 - Restrição de evento (ex. montagem)
 - Restrição de material (ex. peça, protótipos, ...)
 - Ruídos mantidos constante ao longo do experimento
- Azul** - Graus de liberdade (dF – *degrees of freedom*)
- Interações e confundimentos

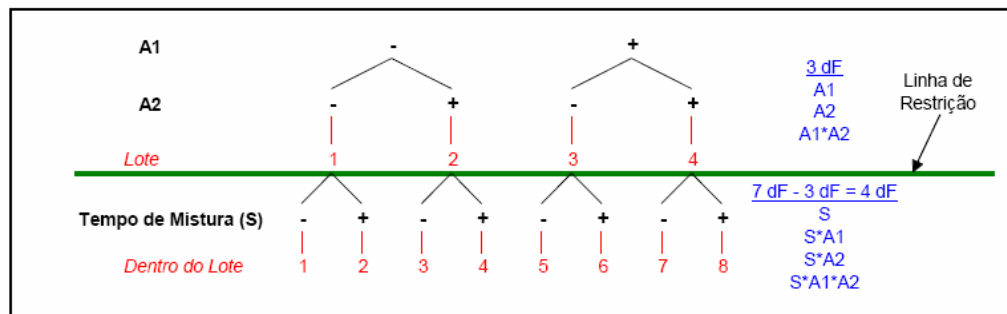


Figura 27 - FRD exemplo de um experimento. Extraído de SANDERS e COLEMAN [23]


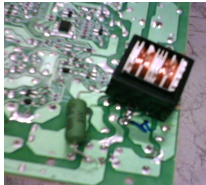
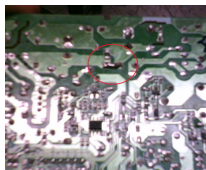



Para a execução do experimento, duas grandes restrições foram encontradas, sendo estas a quantidade de placas Apollo e Pegasus para experimentação, e a quantidade de produtos. Um produto apenas foi escolhido para realização dos testes, e 8 placas foram utilizadas no trabalho. Com estas restrições em mãos o FRD do experimento DOE 1 pode ser criado.

5.1.2. Planejamento final do DOE 1

Os fatores já previamente escolhidos no capítulo anterior, com um pouco mais de detalhamento quanto a teoria utilizada e o nível de cada fator no experimento pode ser visto na Tabela 6 - Fatores e Níveis - DOE 1.

O FRD do experimento pode ser visto na Figura 28, e mostra todos os detalhes do experimento executado. Pode-se notar que a existência de 8 placas em um experimento com 16 tratamentos gerou uma restrição de material. Em termos práticos esta restrição cria no experimento duas seções com erros diferentes (caso a restrição seja significativa), e exige uma análise diferenciada dos resultados. A área acima da linha de restrição é denominada *Whole Plot*, e a área abaixo é denominada *Split Plot*. Mais detalhes no que se refere ao *Whole Plot* e ao *Split Plot*, podem ser encontradas no Anexo 5 – Whole Plot e Split Plot. No FRD está representada também a execução de duas medidas por tratamento, para permitir a execução do MSE.

Tabela 6 - Fatores e Níveis - DOE 1

Fatores		Níveis		Teorias
A.	Capacitor C10	150nF (atual)	470nF ("T") 	Capacitor de filtro de modo diferencial. Este capacitor tem a função de evitar que ruídos em modo diferencial entrem ou saiam da placa eletrônica.
B.	Filtro Modo Comum	Y (Atual, com C71 e C72 + terra)	Choke (com filtro modo comum da placa "T") 	O filtro de modo comum tem a função de atenuar o ruído de modo comum induzido na placa. Na placa "T" temos tanto o filtro Y como o choke. Na placa "A" apenas o filtro Y foi utilizado. A intenção é comparar as duas soluções.
C.	Indutores	L1+L2 (atual)	L1 apenas 	O indutor L2 foi adicionado antes de ser adicionado o filtro Y. A intenção é entender a sua influência e necessidade no projeto para a filtragem de ruídos de modo comum.
D.	Conexão Placa Interface	Porta Freezer (atual)	Porta Refrigerador (curto)	Durante testes de desenvolvimento, foi visto que o ruído conduzido diminuía muito com a diminuição do tamanho da rede elétrica entre a placa "A" e a placa "T".
E.	Roteamento do Cordão de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual 	Direto para o conector 	Atualmente, a passagem alocada na caixa plástica para a entrada do cordão de alimentação, em direção ao conector, pode estar criando um caminho direto por cima da fonte, onde ruído é acoplado diretamente sobre o cordão.
F.	Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual 1 Fan DC	Atual + -1W 	O consumo de corrente DC da fonte, afeta diretamente o controle da fonte chaveada. Um maior consumo pode modificar o duty cycle da chave, gerando mais ruído.
G.	Disposição da rede elétrica	Afastados da Fonte	Próximos a Fonte	Na linha de produção e no projeto, não existe um
H.	Trançamento do cabo de alimentação	Atual	Trançado	O trançamento cria uma indutância no cordão de alimentação, que se opõe a variação de corrente, sendo assim potencialmente um filtro natural para ruídos.

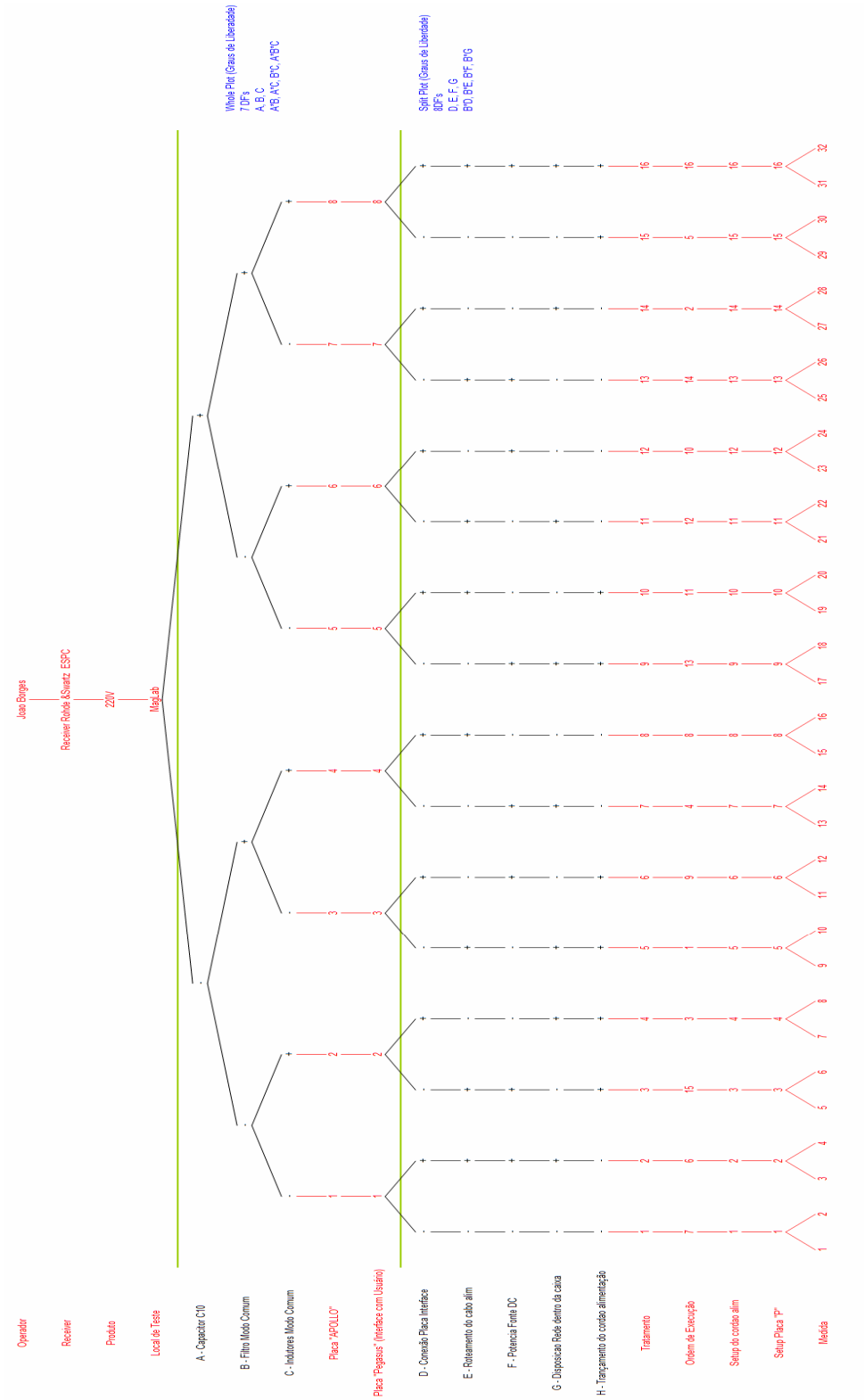


Figura 28 - FRD do DOE 1

5.1.3. Análise do Sistema de Medição – DOE 1

Com um programa criado em LabVIEW®, os dados dos experimentos foram extraídos conforme as variáveis de respostas desejadas. O programa varre todos os arquivos do ensaio, e através das faixas especificadas calcula para cada uma a média e busca os pontos de máximo. Detalhes do programa podem ser vistos no Anexo 6 – Programa de leitura e cálculo das variáveis de resposta. As faixas determinadas para a análise inicial foram:

Faixa 1: 148,5kHz a 2MHz

Faixa 2: 2MHz a 10MHz

Faixa 3: 10MHz a 30MHz

Os resultados obtidos no DOE 1 para o detector de pico e de média podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados brutos - DOE 1

Dissertação de Mestrado						
Aluno: João E. S. Borges						
Nome do Teste: DOE1B - PICO						
Arquivo	Media 1	Media 2	Media 3	Max 1	Max 2	Max 3
DOE_1_T01_M1.DAT	41,18734	34,60881	38,33423	69,89	47,61	50,77
DOE_1_T01_M2.DAT	41,76049	35,42933	38,34056	71,56	47,71	51,36
DOE_1_T02_M1.DAT	37,18352	33,03833	39,66145	61,56	44,29	49,94
DOE_1_T02_M2.DAT	37,48244	33,37711	39,74379	62,98	44,7	49,8
DOE_1_T03_M1.DAT	46,62919	40,65359	37,7075	69,67	51,92	53,64
DOE_1_T03_M2.DAT	47,1725	41,10521	38,16332	70,46	52,68	53,27
DOE_1_T04_M1.DAT	40,3237	37,25761	41,67133	61,49	50,44	58,9
DOE_1_T04_M2.DAT	40,70992	37,38561	41,71527	63,81	50,37	58,72
DOE_1_T05_M1.DAT	45,66456	43,60446	47,05859	69,43	55,63	55,98
DOE_1_T05_M2.DAT	45,10435	43,14589	46,13721	68,33	55,93	54,96
DOE_1_T06_M1.DAT	46,49112	36,0896	34,33346	65,74	59,96	48,39
DOE_1_T06_M2.DAT	46,62911	37,17769	33,54028	67,47	60,9	48,27
DOE_1_T07_M1.DAT	49,89079	46,38547	45,32851	70,52	61,37	60,93
DOE_1_T07_M2.DAT	49,89079	46,38547	45,32851	70,52	61,37	60,93
DOE_1_T08_M1.DAT	42,72034	41,48208	42,64755	61,71	53,54	55,73
DOE_1_T08_M2.DAT	43,63529	42,29326	43,08245	64,49	55,3	53,23
DOE_1_T09_M1.DAT	42,17125	28,57735	35,87558	67,29	47,36	46,06
DOE_1_T09_M2.DAT	43,15998	28,62309	36,4963	68,39	47,92	46,29
DOE_1_T10_M2.DAT	32,9535	27,36172	32,50152	53,2	37,4	47,63
DOE_1_T10_M3.DAT	33,02425	27,42139	32,47464	56,01	35,52	45,63
DOE_1_T11_M1.DAT	47,10926	42,44355	35,88151	72,71	52,72	50,2
DOE_1_T11_M2.DAT	47,61055	42,04756	34,78726	72,96	52,11	45,69
DOE_1_T12_M1.DAT	40,36125	37,58794	40,86034	63,2	53,94	57,78
DOE_1_T12_M2.DAT	40,74	36,85629	40,81772	64,45	48,82	56,89
DOE_1_T13_M1.DAT	46,43786	40,79974	48,95305	65,97	56,81	59,2
DOE_1_T13_M2.DAT	46,43786	40,79974	48,95305	65,97	56,81	59,2
DOE_1_T14_M1.DAT	42,68828	38,54585	39,87404	61,84	49,15	52,17
DOE_1_T14_M2.DAT	42,19675	38,41509	39,6182	63,16	48,35	51,65
DOE_1_T15_M1.DAT	50,42749	46,97711	52,25803	70,83	61,66	64,28
DOE_1_T15_M2.DAT	49,4351	45,64879	52,95775	72,75	61,32	65,36
DOE_1_T16_M1.DAT	47,41741	41,59796	46,65538	65,42	65,45	64,08
DOE_1_T16_M2.DAT	48,40272	42,22284	46,915	66,71	66,24	64,47

Dissertação de Mestrado						
Aluno: João E. S. Borges						
Nome do Teste: DOE 1 - AVERAGE (detector de média)						
Arquivo	Media 1	Media 2	Media 3	Max 1	Max 2	Max 3
DOE_1_T01_M1.DAT	31,59325	24,51026	27,71458	69,03	39,3	40,04
DOE_1_T01_M2.DAT	32,19029	25,28198	27,74227	70,18	39,86	41,09
DOE_1_T02_M1.DAT	27,72306	22,91487	29,38109	60,44	36,85	38,99
DOE_1_T02_M2.DAT	28,48388	23,20675	29,50159	60,51	37,33	38,95
DOE_1_T03_M1.DAT	36,51378	30,74674	27,47318	66,55	48,94	44,02
DOE_1_T03_M2.DAT	37,13873	31,20804	27,9609	69,23	48,03	44,06
DOE_1_T04_M1.DAT	30,67858	27,05298	31,4379	60,29	41,73	48,95
DOE_1_T04_M2.DAT	30,90015	27,11268	31,46965	62,78	41,93	48,53
DOE_1_T05_M1.DAT	34,58399	33,29627	36,9525	68,66	46,97	45,92
DOE_1_T05_M2.DAT	33,97176	32,95697	36,08137	65,6	48	45,06
DOE_1_T06_M1.DAT	34,04582	22,41582	24,0298	61,73	53,18	37,42
DOE_1_T06_M2.DAT	34,67819	23,65384	23,0037	63,69	56,15	37,76
DOE_1_T07_M1.DAT	38,50282	35,27828	35,15012	66,48	56,85	51,42
DOE_1_T07_M2.DAT	38,50282	35,27828	35,15012	66,48	56,85	51,42
DOE_1_T08_M1.DAT	32,15648	30,75346	31,96205	58,68	48,25	46,16
DOE_1_T08_M2.DAT	32,89384	31,50292	33,03092	60,84	51,36	43,87
DOE_1_T09_M1.DAT	32,63026	18,1396	25,69306	66,66	44,86	35,32
DOE_1_T09_M2.DAT	33,5431	18,43921	26,37475	67,86	45,5	36,12
DOE_1_T10_M2.DAT	24,33684	17,26127	22,12303	50,48	30,85	37,14
DOE_1_T10_M3.DAT	24,52316	17,29628	22,40155	54,79	28,69	36,08
DOE_1_T11_M1.DAT	37,39754	32,45936	25,19816	72	48,45	40,31
DOE_1_T11_M2.DAT	37,7307	32,07164	24,3656	70,66	49,22	35,96
DOE_1_T12_M1.DAT	30,75059	27,35755	30,84317	62,25	44,68	48,15
DOE_1_T12_M2.DAT	31,29528	26,7033	30,83872	63,78	43,95	47,36
DOE_1_T13_M1.DAT	34,611	30,56548	39,63525	61,11	53,16	49,97
DOE_1_T13_M2.DAT	34,611	30,56548	39,63525	61,11	53,16	49,97
DOE_1_T14_M1.DAT	31,86556	28,30716	29,38202	57,31	43,53	41,14
DOE_1_T14_M2.DAT	31,63735	28,12703	29,13263	57,79	43	41,17
DOE_1_T15_M1.DAT	38,68904	35,89961	42,73908	65,11	53,92	55,13
DOE_1_T15_M2.DAT	37,468	34,60591	43,44506	68,86	54,35	56,06
DOE_1_T16_M1.DAT	34,86231	28,0727	36,82764	61,65	59,92	55,2
DOE_1_T16_M2.DAT	35,70183	28,77581	37,26955	62,98	61,28	55,1

Com os dados obtidos, Cartas de Controle foram geradas, com um tamanho de subgrupo igual a 2 (n=2 devido as duas medidas executadas por tratamento), para cada uma das variáveis de resposta. Os resultados do detector de Pico estão representados na Figura 29, separados em resultados das Médias (colunas) e das faixas (linhas).

Analisando os resultados do detector de pico, vê-se que nas cartas, pode-se observar que os quesitos de discriminação, repetitividade e estabilidade, as variáveis Média 1, Média 2, Média 3

e Máximo 1, não apresentaram problemas. Já as variáveis Máximo 2 e Máximo 3, apresentaram indício de causas especiais nas respectivas cartas R. Uma análise detalhada mostra que, nas duas medidas executadas no tratamento que mostrou a causa especial, havia uma diferença significativa da aparência do resultado na faixa de frequências de 10MHz a 30MHz (faixa 3). A rigor, as causas deveriam ser melhor entendidas para que as variáveis pudessem ser corretamente utilizadas. No entanto, uma vez que de acordo com os resultados básicos do controle (mostrados na Figura 21 - Resultado de teste de Emissão Conduzida, no produto básico sem filtros) não existe um problema claro nas frequências acima de 10MHz, estas variáveis foram abandonadas. Informações da faixa 3 serão apenas estimadas a partir da variável Média 3.

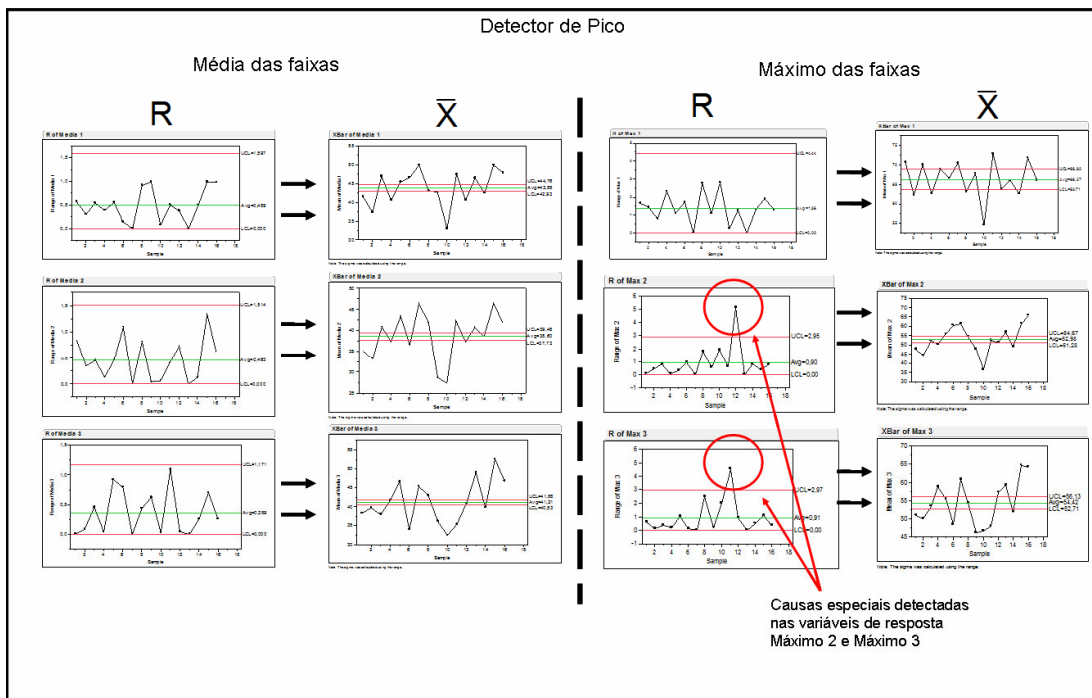


Figura 29- Cartas de Controle - Detector de PICO (DOE 1)

Os dados podem ser sumarizados da seguinte forma para a medida de Pico:

- Para as variáveis Média 1, Média 2, Média 3 e Máximo 1, foi obtido:
 - Discriminação adequada (mostrada pela carta R, com vários platôs)
 - Repetitividade adequada (mostrada pela carta X-barra, com a maioria dos pontos fora de controle)
 - Estabilidade (com a carta R sob controle)

- Pode-se estimar os desvios padrão para Média 1, Média 2, Média 3 e Máximo 1, através da equação 2-9, para um tamanho de subgrupo n=2:
 - $\sigma = 0,433 \text{ db}\mu\text{V}; 0,41 \text{ db}\mu\text{V}; 0,318 \text{ db}\mu\text{V}$ e $1,2 \text{ db}\mu\text{V}$, respectivamente

É muito importante ainda comentar que a avaliação do sistema de medição, executada dentro de um DOE, indica que o experimento executado, nos quesitos comentados do MSE, se mostrou apto a diferenciar os tratamentos, dentro de condições de boa discriminação e estabilidade. Ou seja, o resultado do MSE pode não ser aplicável, por exemplo, a um ambiente produtivo, onde as diferenças entre produtos podem ser menores que as geradas por um experimento planejado.

Para as variáveis de resposta do detector de Média, os resultados foram similares, exceto pelo fato de não terem sido detectadas causas especiais na variável Máximo 2. Ainda assim, esta não será analisada pelos mesmos motivos do abandono da variável Máximo 3.

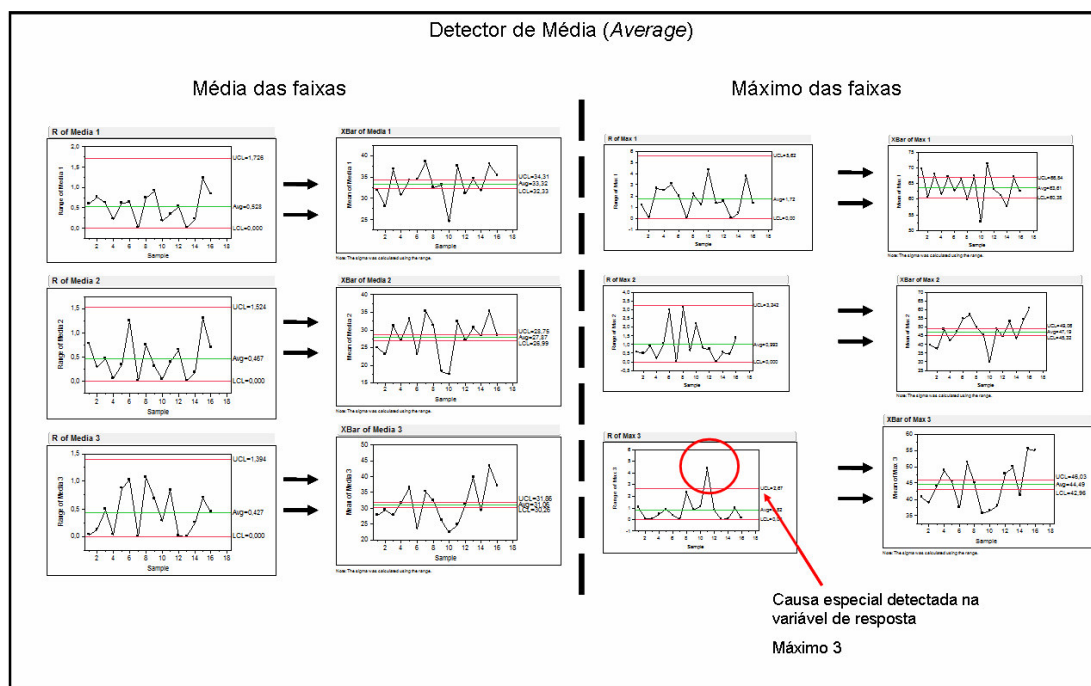


Figura 30 - Cartas de Controle - Detector de MÉDIA (DOE 1)

Concluiu-se com as análises apresentadas que o sistema de medição (que inclui a escolha das variáveis de resposta) foi adequado para a execução do DOE. Finalizada esta etapa, a análise do experimento em si pode ser realizada com as variáveis que não apresentaram causas especiais.

5.1.4. Análise do DOE 1 – Detector de Pico

Uma vez aprovado o sistema de medição, pode-se calcular a média dos dois experimentos executados por tratamento, para obter a tabela de dados necessária para a análise do DOE. Na análise de experimentos planejados, 3 grandes etapas são tidas como essenciais e imprescindíveis, em sua ordem de execução: Análise prática, Análise Gráfica e Análise Quantitativa. O que isto diz é que o engenheiro quando executa um teste, não deve apenas lançar os dados em algum pacote de Software estatístico, e, com base na saída, tomar ações sem realmente ter aplicado raciocínio crítico na análise do experimento.

Na análise prática, busca-se padrões nos dados, verifica-se se a variável de resposta foi afetada pelos tratamentos, verifica-se efeitos claros de fatores e busca-se interações destes efeitos com a ordem de execução entre outras observações. Uma das ferramentas utilizadas nesta análise é conhecida como ANOG ou *Analysis of Goods*, utilizada para identificar padrões nos dados. Sua execução consiste apenas em ordenar a matriz do experimento dos menores valores para os maiores valores da variável de resposta. O experimentador pode então buscar padrões visuais na coluna de cada fator. A análise inicial estudou a Faixa 1 (0,15MHz a 2MHz) com a média desta faixa.

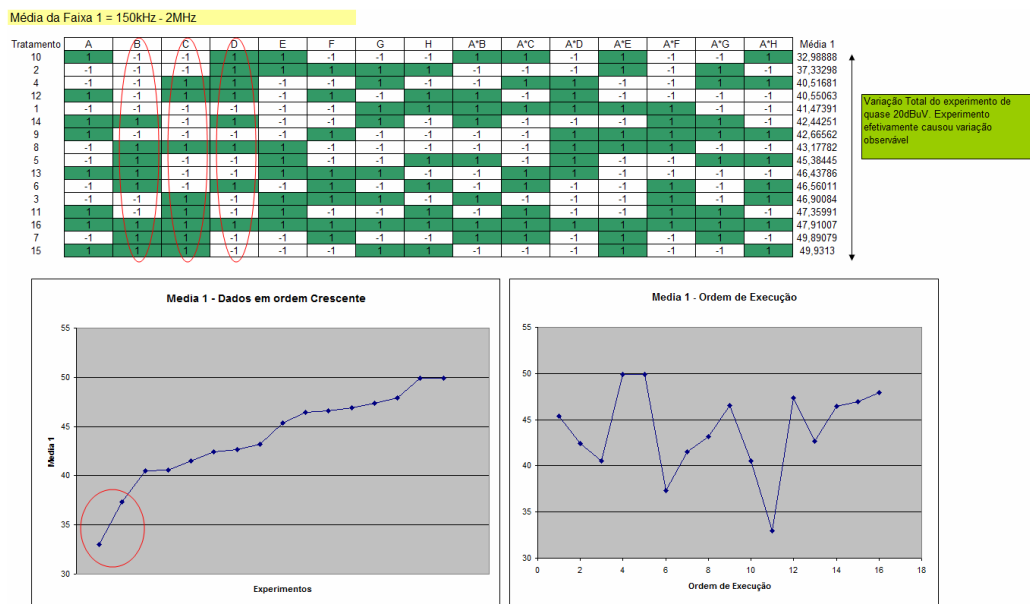


Figura 31 - Análise Prática - Média 1 do Detector de Pico (com ANOG) – DOE 1

A análise prática mostra claramente que variação significativa foi gerada, além de mostrar que os fatores B, C e D possuem forte indício de terem afetado a resposta. Os fatores são o Filtro de modo comum, os indutores e o comprimento da rede elétrica da interface. A direção que esta análise mostra, também está em linha com as teorias criadas para o experimento, sendo portanto consideradas plausíveis.

Além disso, dois gráficos foram gerados, para mostrar os dados em ordem crescente, e por ordem de execução, com o objetivo de identificar possíveis causas especiais. No gráfico de ordem crescente dos dados (a esquerda na Figura 31), dois tratamentos muito mais baixos que a tendência geral do experimento podem ser encarados como uma possível causa especial.

Com os comentários acima feitos, o experimentador pode então partir para uma análise gráfica, onde busca identificar utilizando mais ferramentas do DOE, identificar quais são os fatores efetivamente ativos, e quais não são, através dos diagramas de efeitos de fatores e testes de significância estatística.

Vale ressaltar que para experimentos com 16 tratamentos, em um experimento fatorial fracionado não replicado, é altamente recomendada a aplicação de uma transformação nos dados, com o intuito de eliminar conclusões precipitadas com dados que podem estar sendo afetados por causas especiais ou por violações às suposições básicas para testes estatísticos. Pode-se aplicar algumas transformações mais complexas, mas que demandam grande habilidade do experimentador, como a transformação de Box-Cox ou a análise Bayesiana. Conforme comenta TORRES [25], ao invés disso, uma transformação muito mais simples apresenta bons resultados quando aplicada em 16 tratamentos, que é conhecida como *Rank*, ou ordenamento. A análise de *Rank* envolve uma transformação simples de cada variável de resposta que usa o *Rank* (organização em ordem crescente) da resposta. Se as conclusões da análise padrão e da análise de *Rank* não coincidirem, há 3 possibilidades:

- 1) Uma causa especial ocorreu durante o experimento, permitindo que uma ou mais observações exerçam influência excessiva sobre a linha de "melhor resultado" no NPP (Gráfico de Probabilidade Normal).
- 2) Suposição estatística de variação constante para todos os tratamentos foi violada - a variação da resposta está se movendo com a média; um ou mais fatores estão afetando a variação e a média; o ruído ao qual cada tratamento é submetido não é o mesmo.
- 3) Variável de resposta errada para Y - possivelmente um Y não linear; superfície de resposta muito complexa para o experimento capturar/modelar.

Identificadas disparidades entre a análise regular e a análise de *Rank*, o experimentador deve buscar entender qual pode ser o motivo da disparidade. Caso seja necessário seguir em frente com os dados, a análise de *Rank* é a preferida.

Nota-se no entanto, que como comentado na seção 5.1.1, o DOE 1 não pode ser completamente randomizado, possuindo portanto uma restrição. Esta restrição gera dois “ambientes” experimentais, chamados de *Whole Plot* e *Split Plot*. No entanto, como não se conhece o quão forte é a restrição, inicialmente uma análise que considera o experimento completamente randomizado é executada, e depois análises parciais do *Whole* e do *Split Plot* são feitas. Se encontrarmos diferenças significativas entre as análises, isso pode ser um indício de forte restrição.

A análise estatística completamente randomizada, para nosso experimento não replicado, consiste em calcular os efeitos dos fatores, e com estes obter o Gráfico de Probabilidade Normal, ou *Normal Probability Plot*. Com ele, através do cálculo do PSE [13] é possível determinar a partir da determinação de um erro aceitável tipo I (ou α), que nas ferramentas estatísticas para testes iniciais é assumido de 20%. Com estes dados, o gráfico de Pareto pode ser criado, mostrando quais são os fatores mais significativos.

O resultado desta análise pode ser visto na Figura 32, e mostra que existe alguma discordância entre a análise regular e a de *Rank*, porém pequena, uma vez que os fatores mais significativos apresentaram-se corretamente em ambas, além de seguir a mesma ordem. Nas duas análises, os fatores mais significativos foram:

B = Tipo do Filtro de Modo Comum

C = Arranjo dos indutores

D = Comprimento da conexão entre Apollo e Pegasus.

Na Figura 32 essas conclusões podem ser obtidas, pois nela, na seção *Parameter Estimate Population*, o software mostra o efeito calculado de cada fator (*Estimate*) e o valor calculado do seu *pseudo p-value* (*p-value* é a probabilidade de ser ruído do experimento – pseudo pois o experimento não é replicado). Com o valor do efeito de cada fator, utilizando as operações matemáticas propostas por LENTH [13] para análise de fatoriais não replicados, é possível estimar o seu *p-value*. Valores de *p-value* iguais ou inferiores a 0,2 (20%) levam a crer que o fator é significativo. O efeito de cada fator pode ser colocado em ordem e mostrado também na Figura 32 na forma de um gráfico de Pareto. A linha verde divide os fatores ativos (acima da linha) dos fatores considerados ruídos (abaixo da linha).

Alguns fatores foram considerados significativos na análise regular, e não na de *Rank*. Isto pode ocorrer devido a causas especiais como já supracitado, e os fatores apenas serão

considerados se nas análises de *Whole* e *Split Plot* esta significância se confirmar. Sobre os fatores B e C não se pode afirmar sua significância ainda, devido à restrição experimental de 8 Placas, uma vez que estes fatores se encontram no *Whole Plot*. Sobre o fator D, é possível considerá-lo ativo desde já por estar no *Split Plot*.

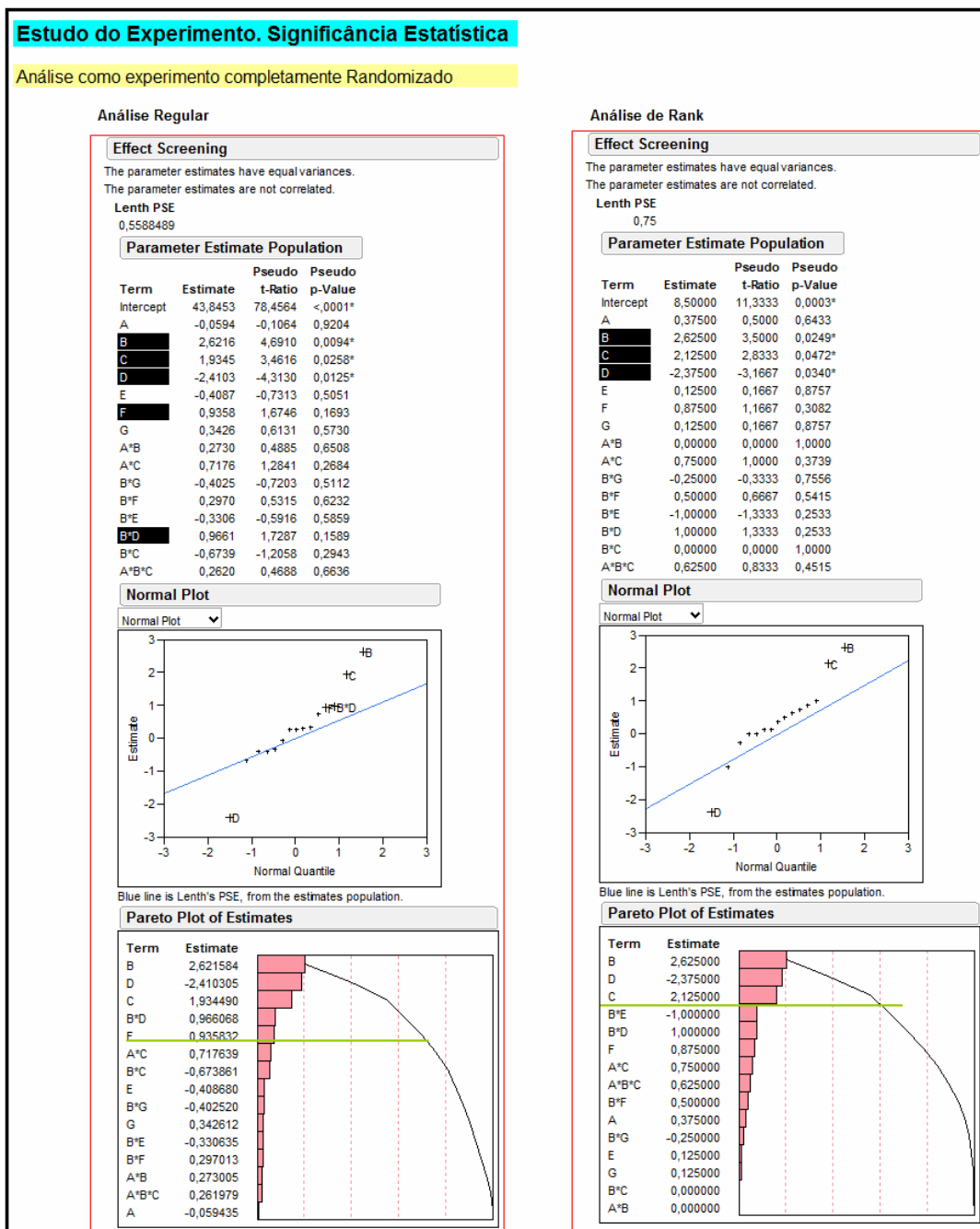


Figura 32 - Análise CRD – Média 1 – Pico - DOE 1. Gráficos obtidos com Software JMP®

Outro gráfico de extrema importância para o estudo, principalmente para apontar a direção para o próximo experimento, é o gráfico de efeitos. Este gráfico mostra em que direção o fator influenciou a variável de resposta, fornecendo assim um caminho ao experimentador para planejar seus próximos experimentos. O gráfico de efeito dos fatores pode ser visto na Figura 33.

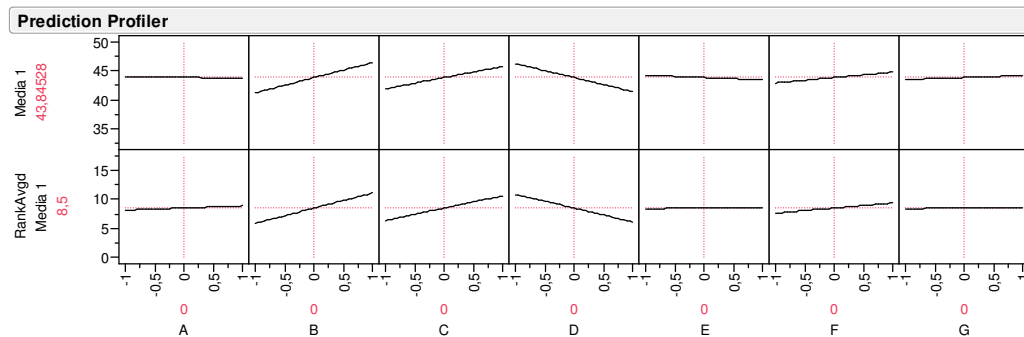


Figura 33 - Efeito dos Fatores – Média 1 – Pico - DOE 1. Gráfico obtido com Software JMP®

A análise do Whole Plot pode ser feita de maneiras diferentes. No caso do DOE 1, como existem 7 graus de liberdade, a geração de um Gráfico de Probabilidade Normal e cálculos de significância são pertinentes. Neste caso, os dados são sumarizados até que restem apenas os fatores A, B e C, e suas interações.

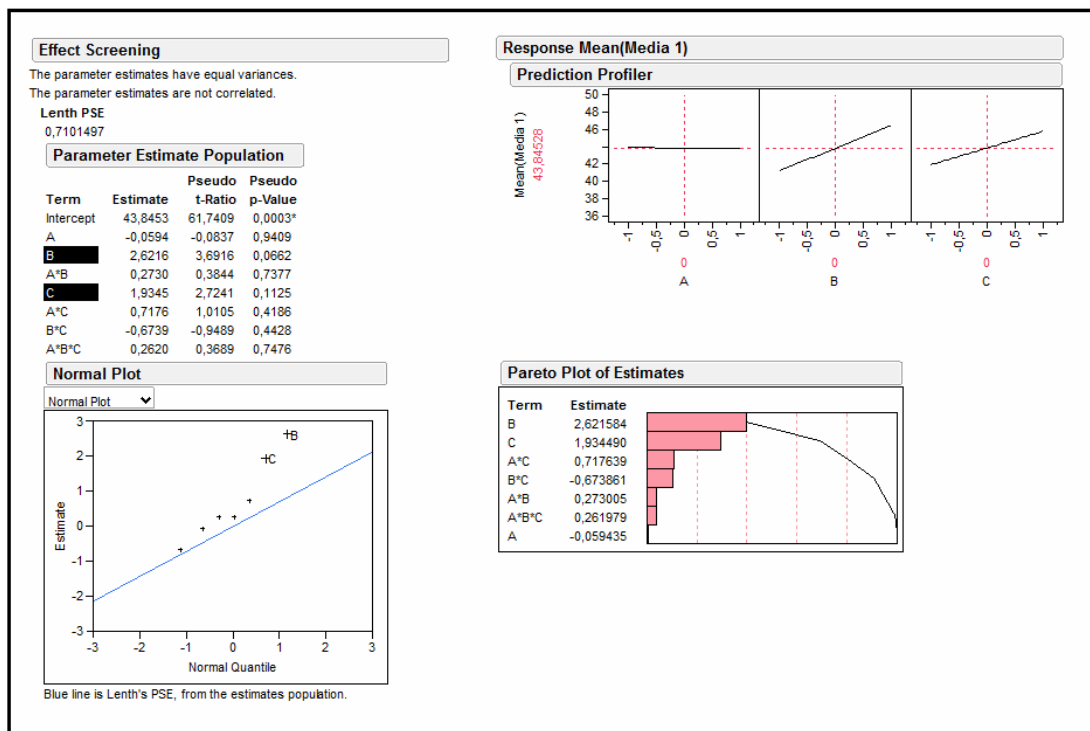


Figura 34 - Análise *Whole Plot* – Média 1 – Pico - DOE 1. Gráfico obtido com Software JMP®

O estudo do *Whole Plot* confirma os fatores B e C como efetivamente significativos, mesmo sob o maior ruído do *Whole Plot*. Também nota-se, que a indicação do fator B é para o uso do filtro Y (ao invés do *Choke*), e do fator C é o uso dos dois indutores (ao invés de apenas um indutor).

O estudo do *Split Plot* é feito normalmente utilizando o Gráfico de Probabilidade Normal também, mas este não foi gerado diretamente pelo software JMP® da empresa SAS®. Um software que utiliza o algoritmo computacional proposto por LENTH [13] foi criado para gerar o gráfico e também checar os fatores ativos. Detalhes do programa podem ser encontrados no Anexo 7 – Programa de análise – NPP e Pareto (com fatores ativos).

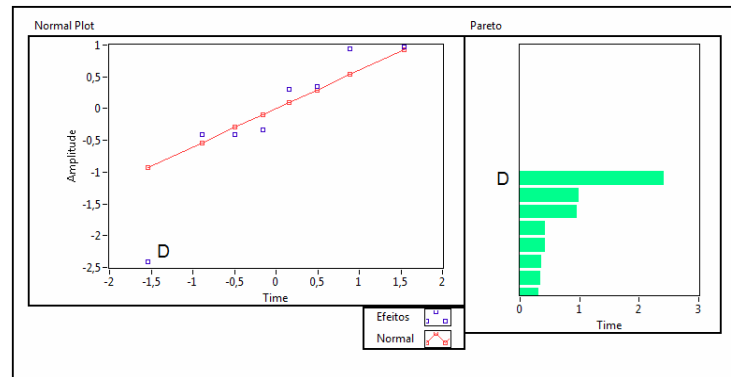


Figura 35 - Análise do *Split Plot* - Média 1 - Pico - DOE 1

A análise do gráfico mostrado na Figura 35 mostra que o fator D se destaca dos demais. Fora ele, nenhum outro fator apresenta uma clara significância para o experimento. Com esta análise, encerrou-se o estudo da Média da faixa 1, do detector de pico, como tendo os seguintes fatores significativos, em seus seguintes níveis:

B - Filtro de modo comum com C71 e C72 + Terra

C - Uso dos dois Indutores, L1 e L2

D - Porta Refrigerador (curto)

Análises muito similares foram executadas para as variáveis Média da Faixa 2 e Média da Faixa 3 para o detector de Pico. Além disso, a análise do Máximo da faixa 1 foi executada também. Durante o trabalho, foram feitas todas as análises em todos os dados, mas por simplicidade de apresentação, na Figura 36 é mostrado apenas a análise gráfica (CRD) executada para a Média 2.

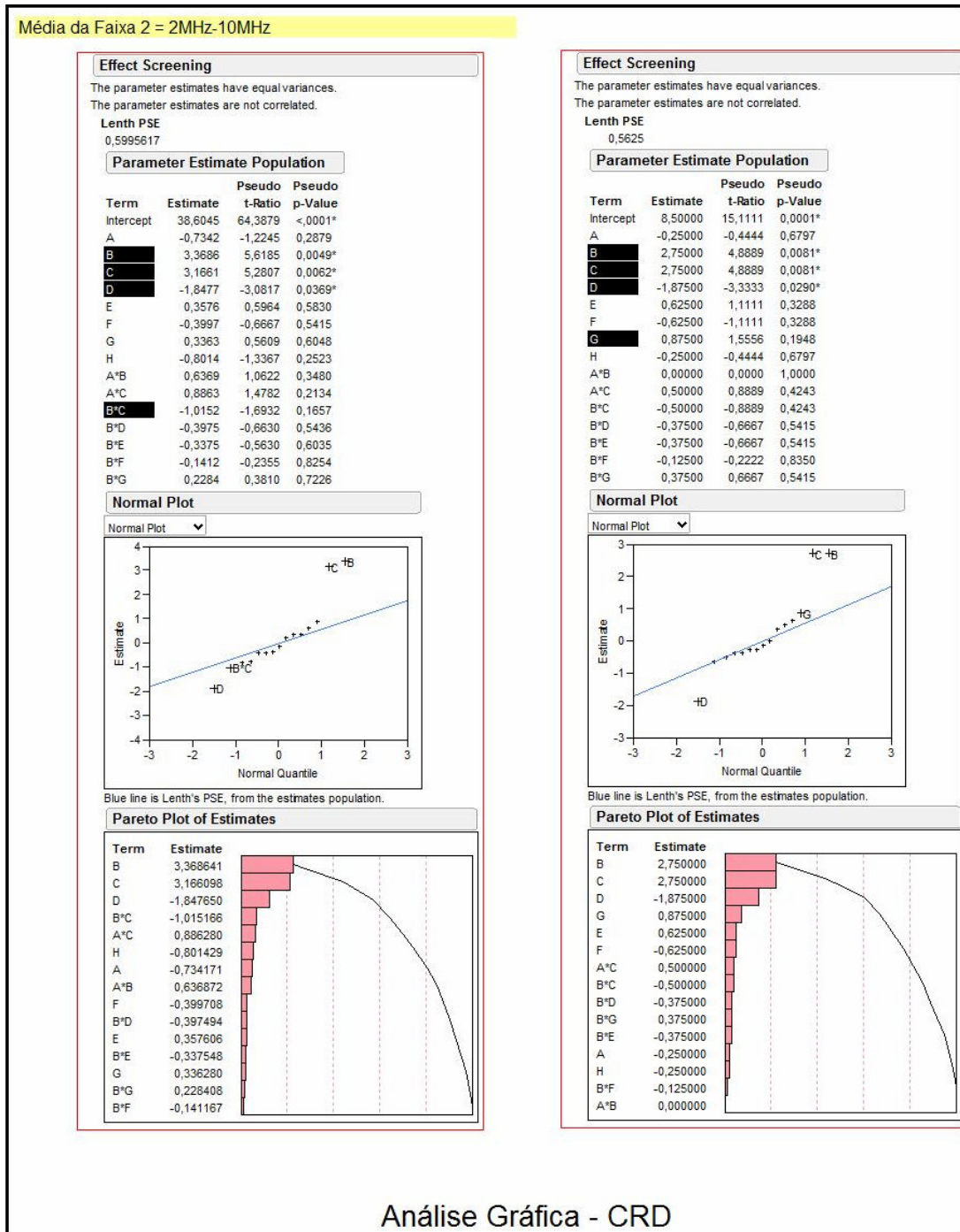


Figura 36 - Análise Gráfica (CRD) - Média 2 - Pico - DOE 1.

Estudos da restrição similares aos executados para a Média 1, indicaram os mesmos fatores B, C e D como significativos. Com menos influência, o fator E - Roteamento do cordão de alimentação não passando pela fonte chaveada, foi visto no *Split Plot*.

Os resultados da análise gráfica CRD para a variável Média 3 podem ser vistos na Figura 37.

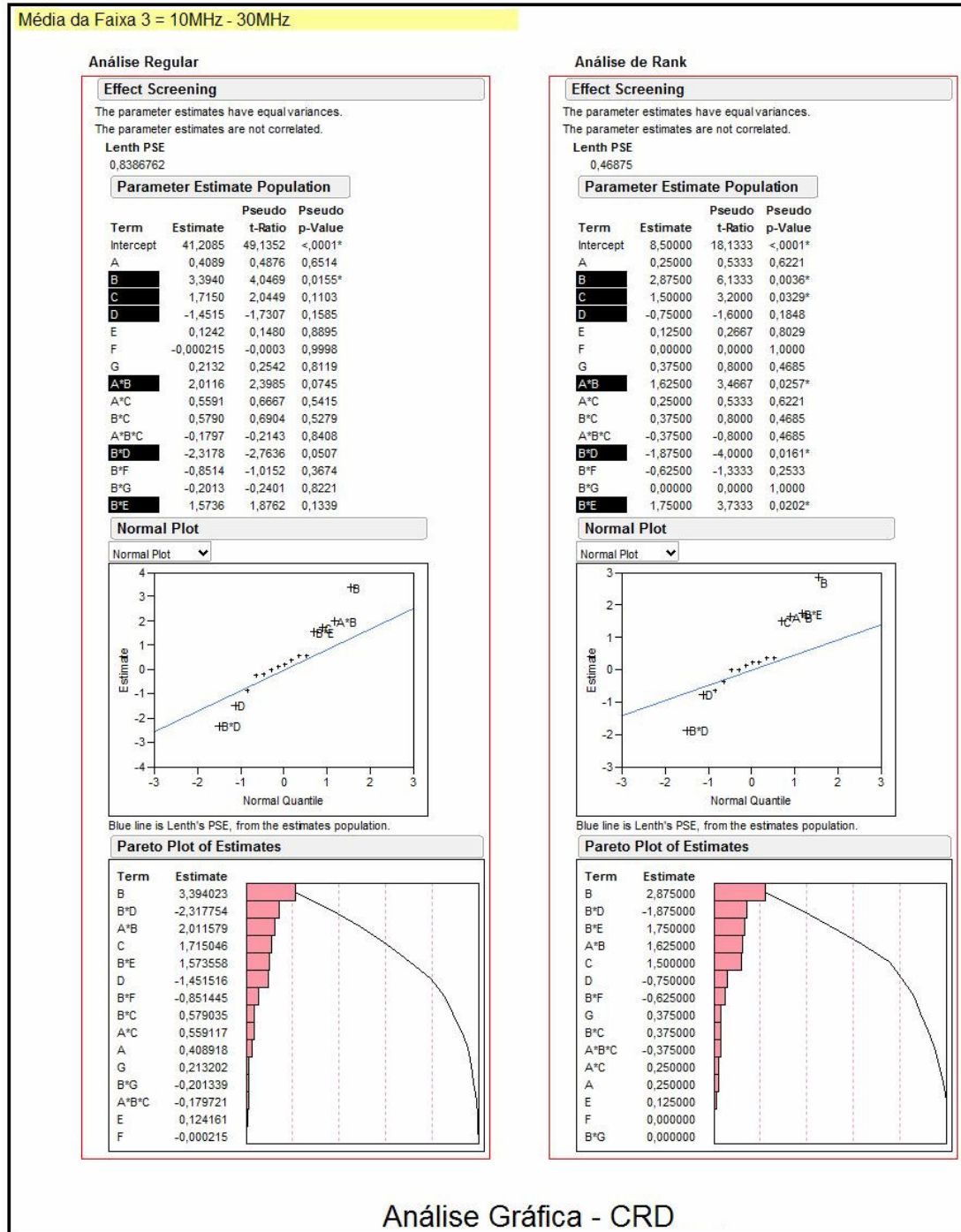


Figura 37 - Análise Gráfica (CRD) - Média 3 - Pico - DOE 1.

O detalhamento da Média 3, no estudo não completamente randomizado, mostrou que além dos fatores principais B, C e D, a variável de resposta apresentou susceptibilidade a efeitos de algumas interações, sendo estas as interações A*B, B*D e C*D. As interações querem dizer que um dado fator possui um efeito diferenciado dependendo do nível de outro fator. Com um DOE de resolução IV, as interações de segunda ordem apresentam confundimento com outras interações de segunda ordem. Estes confundimentos podem ser vistos na Tabela 8. Portanto, nenhuma conclusão será feita apenas com esses dados, mas sim a partir de um novo experimento.

Tabela 8 - Confundimentos do DOE 1

Confundimentos							
A	B*C*H	B*D*G	B*E*F	C*D*F	C*E*G	D*E*H	F*G*H
B	A*C*H	A*D*G	A*E*F	C*D*E	C*F*G	D*F*H	E*G*H
C	A*B*H	A*D*F	A*E*G	B*D*E	B*F*G	D*G*H	E*F*H
D	A*B*G	A*C*F	A*E*H	B*C*E	B*F*H	C*G*H	E*F*G
E	A*B*F	A*C*G	A*D*H	B*C*D	B*G*H	C*F*H	D*F*G
F	A*B*E	A*C*D	A*G*H	B*C*G	B*D*H	C*E*H	D*E*G
G	A*B*D	A*C*E	A*F*H	B*C*F	B*E*H	C*D*H	D*E*F
H	A*B*C	A*D*E	A*F*G	B*D*F	B*E*G	C*D*G	C*E*F
A*B	C*H	D*G	E*F				
A*C	B*H	D*F	E*G				
A*D	B*G	C*F	E*H				
A*E	B*F	C*G	D*H				
A*F	B*E	C*D	G*H				
A*G	B*D	C*E	F*H				
A*H	B*C	D*E	F*G				

Whole Plot

Split Plot

A última variável de resposta analisada com o detector de Pico foi o valor Máximo da Faixa 1. Na sua análise CRD, vários fatores aparentavam ser significativos. No entanto, ao analisar o *Whole Plot* e *Split Plot*, apenas os fatores D e a interação B*D foram considerados ativos. Pode-se ver detalhes do estudo *Split Plot* da variável Máximo 1, na Figura 37.

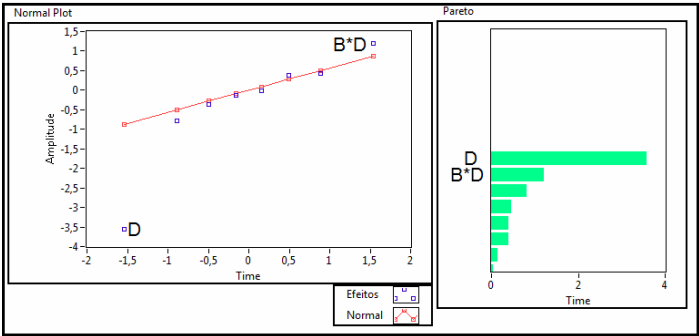


Figura 38 - Análise Split Plot - Máximo 1 - Pico - DOE 1

5.1.5. Análise do DOE 1 – Detector de Média

A análise utilizando o detector de média, foi praticamente idêntica a realizada para o detector de pico. O único comentário pertinente a esta análise é que o fator E, que na análise de Pico havia mostrado uma influência muito baixa na variável de resposta, no estudo com o detector de Média, se mostrou mais significativo.

5.1.6. Conclusões Parciais do DOE 1

Observando essas 7 variáveis de resposta para o valor médio de todo o ruído conduzido, medido pelo detector de pico, condensaram-se algumas conclusões. Primeiramente, alguns fatores não apresentaram atividade alguma, sendo fatores inativos e aptos a serem abandonados para próximos experimentos:

H - Trançamento do cordão de alimentação.

G - Disposição da rede na caixa de controle.

Estas conclusões já são por si só muito interessantes, já que esclarece a dúvida de efetividade dessas medidas, que até o momento carecia de comprovação prática.

O fator C considerado ativo pode ser mantido no nível de 2 indutores, se for necessário . Outros fatores que devem ser melhor estudados, já que apresentaram significância estatística no primeiro experimento são B, D e E. Questões remanescentes

B - É possível melhorar o filtro de modo comum?

D - Qual a relação do comprimento da fiação da interface com o ruído?

E - Este fator é efetivamente significativo?

Algumas outras conclusões podem ser derivadas:

- A maior fonte de ruído aparenta ser de modo comum, uma vez que as medidas de redução de ruído de modo comum foram as que mais reduziram o ruído conduzido nos experimentos. Fontes possíveis de ruído de modo comum:
 - Acoplamento do ruído da fonte através da fiação do ventilador DC
 - Acoplamento do ruído da fonte através da fiação da placa interface
 - Teoria que pode ser considerada enfatizada pelo resultado do fator D. Uma menor fiação, leva a um menor caminho de acoplamento de ruído de modo comum.

Outras observações: Tirando um dos tratamentos, nenhum dos demais tratamentos efetuados efetivamente apresentou níveis de ruído conduzido aceitáveis em norma. Ou seja, os fatores selecionados nos níveis selecionados ainda não foram suficientes para atenuar o ruído emitido pelo produto.







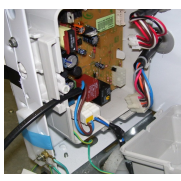

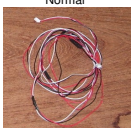





Com base nas conclusões mencionadas para o DOE 1, foi decidido executar um novo experimento, ainda fatorial e fracionado de resolução IV. Este novo experimento tem por objetivo clarificar os resultados obtidos no primeiro DOE, e além disso, adicionar novos fatores ao estudo, devido ao fato de ainda não ter obtido uma resposta que enquadre o produto na norma pertinente.

5.2.O SEGUNDO EXPERIMENTO – DOE 2

O resultado do DOE 1 foi muito interessante para as faixas 1 e 2, mas gerou muita dúvida na faixa 3. Isto pode ser devido ao próprio tamanho da faixa escolhida, que é muito maior que as outras duas, além de uma média aritmética possivelmente não ser representativa do que efetivamente os dados mostram. Ainda assim, para o segundo experimento foi decidido continuar na mesma linha de variáveis de resposta e faixas, pois o foco de problemas, conforme visto na Figura 21, está nas frequências abaixo de 10MHz.

Assim sendo, retornou-se ao Mapa de Raciocínio, adicionando os resultados obtidos no DOE 1. Também uma atualização do Mapa de Produto foi necessária, afim de identificar novos fatores que pudessem reduzir ainda mais o ruído conduzido, e enquadrar o produto na norma. Com mais estudos e discussões no Mapa de Produto, foi decidido utilizar os seguintes fatores para o segundo experimento:

Tabela 9 - Fatores e Níveis - DOE 2

Fatores		Níveis (-) (+)		Teorias
A.	Capacitor C10	150nF (atual)		Fator inativo em DOE anterior, mostrando que ruído diferencial não é o foco.
B.	Filtro Modo Comum	Y (Atual, com C71 e C72 + terra) 	Choke + Y 	Estudo da melhor solução do DOE anterior, e uma combinação das duas possíveis.
C.	Indutores Modo Comum	L1+L2 (atual) 	L1 apenas 	O indutor L2 foi adicionado antes de ser adicionado o filtro Y. A intenção é entender a sua influência e necessidade no projeto para a filtragem de ruídos de modo comum.
D.	Conexão Placa Interface	Porta Freezer - (atual) 	Porta Refrigerador (curto) 	Durante testes de desenvolvimento, foi visto que o ruído conduzido diminuía muito com a diminuição do tamanho da rede elétrica entre a placa "A" e a placa "P".
E.	Roteamento do Cordão de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual 	Direto para o conector 	Atualmente, a passagem alocada na caixa plástica para a entrada do cordão de alimentação, em direção ao conector, pode estar criando um caminho direto por cima da fonte, onde ruído é acoplado diretamente sobre o cordão.
F.	Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual 1 Fan DC	Atual + ~1W	O consumo de corrente DC da fonte, afeta diretamente o controle da fonte chaveada. Um maior consumo pode aumentar o duty cycle da chave, gerando mais ruído
G.	Disposição da rede elétrica dentro da caixa	Afastados da Fonte	Próximos a Fonte	Fator inativo em DOE anterior. Principalmente devido ao fato de
H.	Trançamento do cabo de alimentação	Atual		Fator inativo em DOE anterior.
I.	Trançamento do cordão da interface	Normal 	Trançado 	De acordo com EMC for Product Designers, pg 269, cabo trançado pode ser útil inclusive para ruído de modo comum.
J.	Distanciamento do cabo da interface, da chapa do produto	Cabeamento colado na chapa 	Cabeamento distanciado de aproximadamente 2cm da chapa 	Com o cordão distanciado da chapa do produto, se o acoplamento capacitivo do ruído de modo comum estiver acontecendo por ali, teremos uma diminuição do ruído emitido
K.	Ferrite de Modo Comum	Sem Ferrite 	Com Ferrite 	Se o ruído predominante é de modo comum, um ferrite na linha de terra pode ser uma solução para reduzir drasticamente o ruído emitido.

A tabela e a marcação alfabética dos fatores foi mantida de forma a mostrar o histórico dos experimentos realizados, mostrando claramente os fatores reusados, abandonados e novos. Neste experimento, 3 fatores do DOE 1 foram abandonados e 3 novos fatores foram levantados.

O primeiro fator escolhido foi trançar a rede elétrica que faz a comunicação entre a placa Apollo e a placa Pegasus. Esta medida baseou-se em WILLIAMS [16], que comenta que o Trançamento de rede por onde passa sinal interferente, pode ajudar a reduzir tanto ruído diferencial

como ruído de modo comum. Com esta medida, a rede de comunicação, que no experimento anterior era utilizada dentro do poliuretano do produto, passou a ser posicionada externamente à carcaça, para permitir seu manuseio quanto aos fatores escolhidos.

Outro fator adicionado no experimento foi o distanciamento da rede elétrica de comunicação da carcaça do produto. A teoria por trás desse fator é a de que uma vez que o maior ruído presente aparenta ser de modo comum, e também considerando que o comprimento da rede da interface foi significativo, um caminho possível para o ruído poderia ser pela capa metálica. Mais especificamente, um acoplamento capacitivo entre a carcaça e a rede de comunicação entre as placas é o que se deseja verificar.

O último mas não menos importante fator adicionado no experimento foi a adição de um ferrite no fio de aterramento do produto. Esta é uma solução já testada e implementada em produtos atualmente comercializados, mas que por diversos motivos não é interessante para o fabricante (principalmente por custos diretos e de montagem). O ferrite utilizado foi utilizado com o mesmo número de espiras que são utilizados atualmente em produção do produto sob estudo.

5.2.1. Restrições à Randomização – DOE 2

Para a execução do DOE 2, as restrições existentes no DOE 1 foram mantidas, sendo essas a existência de apenas 8 controles eletrônicos Apollo e 8 controles Pegasus. Além disso, o uso de apenas um produto continua, devido a complexidade de execução de experimento com mais produtos.

5.2.2. Planejamento final do DOE 2

O DOE 2 contou com menos experimentos realizados, uma vez que aqui não havia o objetivo de voltar a testar o sistema de medição. Assim sendo, 16 experimentos foram realizados, sem repetição da medição (lembrando que no DOE 1, também foram feitos 16 tratamentos, mas foram executadas 2 medidas por tratamento). Com base na quantidade de fatores escolhidos, a resolução deste experimento também ficou:

$$2_{IV}^{8-4}$$

(5-2)

O FRD do experimento pode ser visto na Figura 39.

A execução deste DOE exigiu a colocação de um espaçador externo ao produto, para que a fiação pudesse ser posicionada ao longo do mesmo, com um espaçamento constante. Vale ressaltar que o teste foi feito com a fiação por fora, por facilidade de execução. Uma implementação possível deste fator em produção, é afastar a fiação por dentro do Poliuretano, uma vez que existe espaço entre a capa metálica externa e a caixa plástica interna.

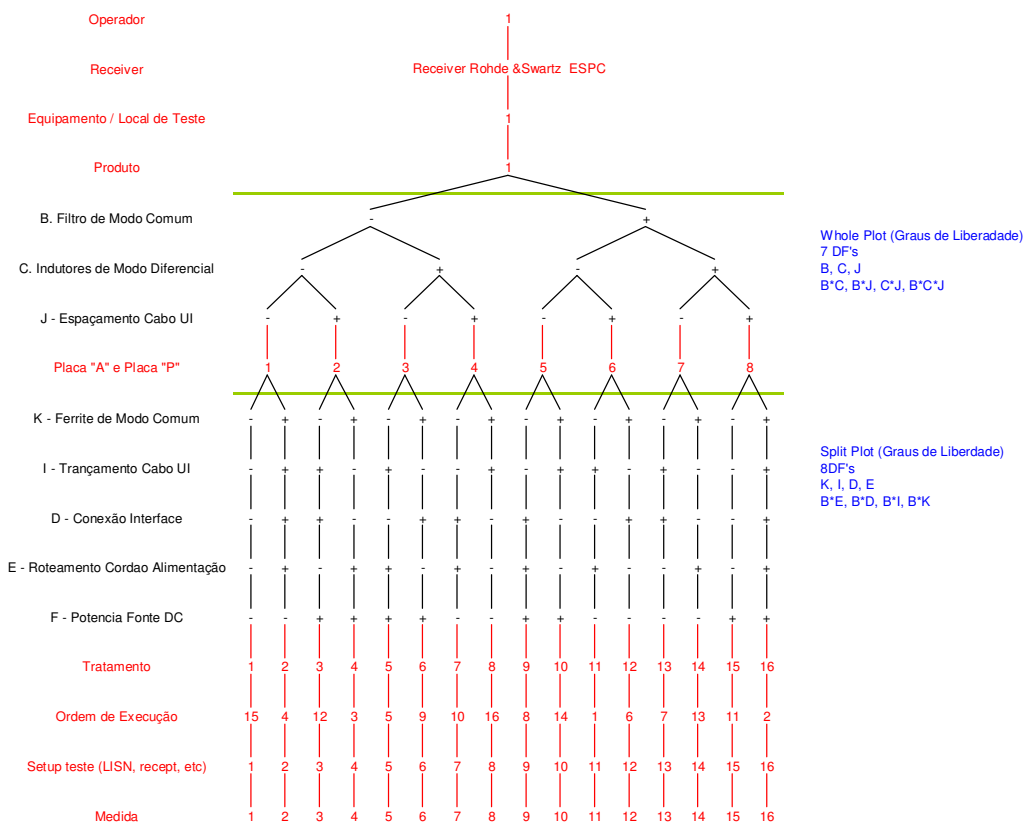


Figura 39 - FRD do DOE 2

5.2.3. Análise do DOE 2 – Detector de Pico

A análise do DOE 2 seguiu os mesmos passos que o DOE 1. Assim sendo, todas as variáveis de resposta foram analisadas pelo lado prático, com o uso do ANOG e gráficos dos dados em ordem crescente e ordem de execução. Nesta etapa, nenhum indício claro de causa especial foi visto, e os fatores K e D para a faixa 1, C e D para a faixa 2 e B e C para a faixa 3 foram classificados como possíveis fatores significativos.

Partindo dessas informações, foi possível gerar os gráficos de significância estatística considerando o experimento CRD, com análises regular e de *Rank*.

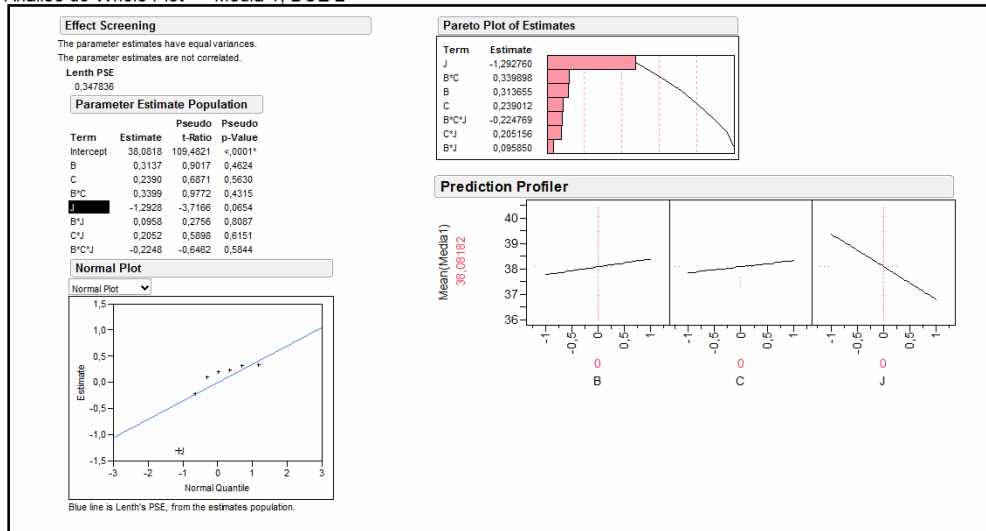
Analizando a variável Média 1, constatou-se, através de estudo separado do *Whole* e o *Split Plot*, que os fatores significativos foram K, D e J, que são respectivamente o ferrite de modo comum, o tamanho da rede elétrica entre Apollo e Pegasus e a distância da rede da chapa metálica do produto. Os gráficos podem ser vistos na Figura 40. O gráfico dos efeitos, também mostrado na mesma figura, mostra que:

K – A presença do ferrite foi o fator mais forte;

D – Fiação curta da fiação entre Apollo e Pegasus, ajudou bastante a redução do ruído;

J – Distância maior entre a fiação e a chapa também foi significativa para reduzir o ruído conduzido na faixa 1.

Análise do Whole Plot — Média 1, DOE 2



Análise do Split Plot - Média 1 - DOE 2

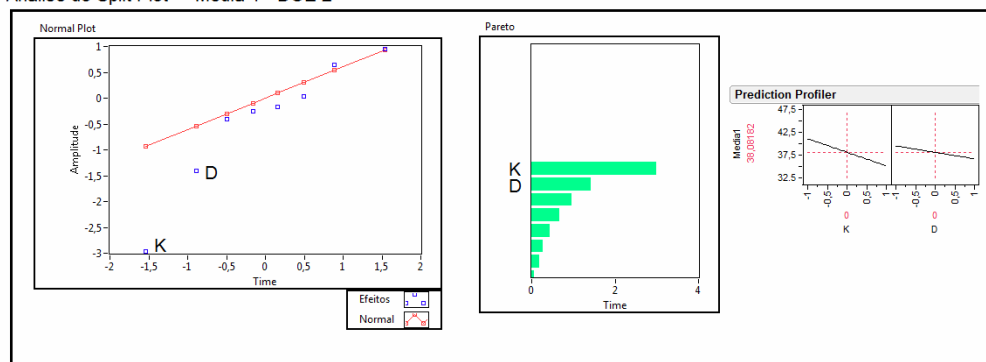
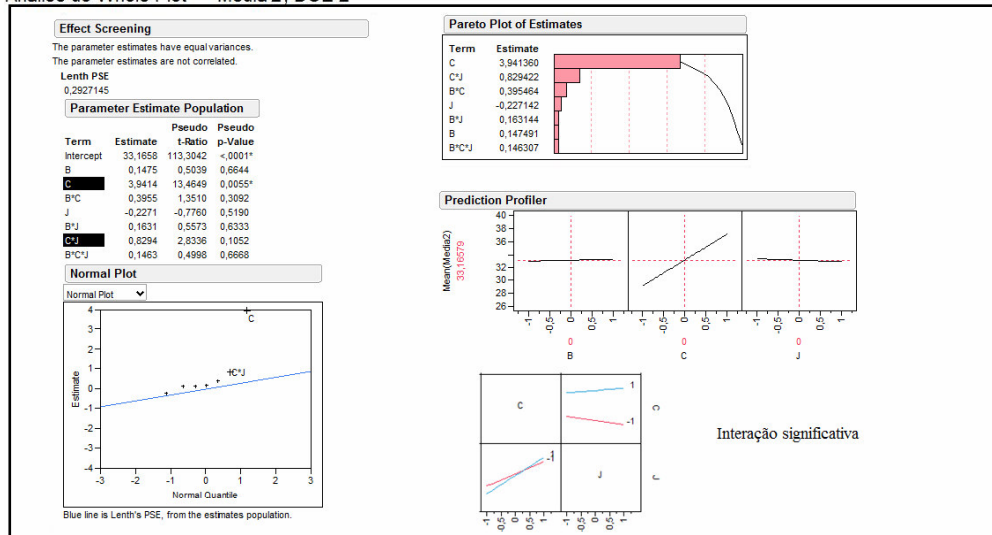
Detector
de Pico

Figura 40 - Análise Whole e Split Plot - Média 1 - Pico - DOE 2

Esses resultados concordam com as teorias elaboradas, aumentando o grau de confiança de que o maior problema de emissão do produto é devido a ruído de modo comum, e que o caminho do acoplamento é constituído pela rede de comunicação interna e a carcaça metálica do produto.

Continuando na análise, a Média 2 foi estudada, notando-se que à medida que a frequência aumenta da faixa 1 para a faixa 2, o fator K acaba por não ser tão significativo, e não é considerado ativo. Isto pode ser considerado um indicativo de que para maiores frequências, o ruído de modo comum não é o predominante.

Análise do Whole Plot — Média 2, DOE 2



Análise do Split Plot - Média 2 - DOE 2

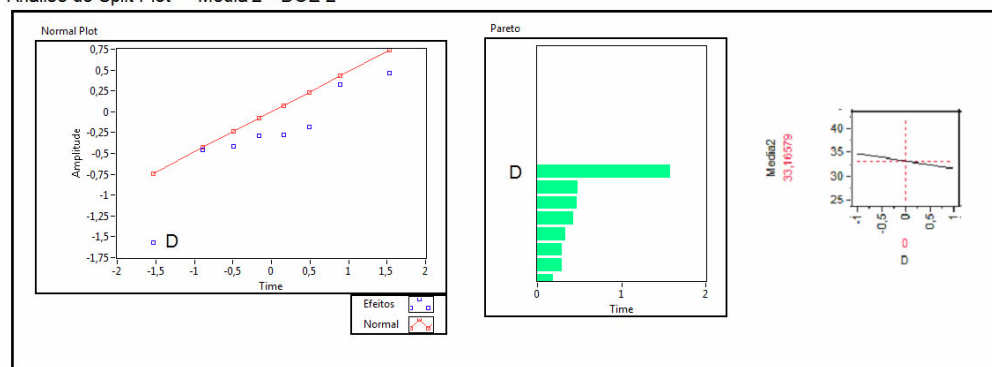


Figura 41 - Análise Whole e Split Plot - Média 2 - Pico - DOE 2

Esta análise mostrou uma interação significativa, $C*J$, que está confundida com outras interações de segunda ordem, como $B*F = K*I = D*E$. No entanto, uma vez que C foi o fator mais ativo deste experimento, existe uma grande probabilidade de que a interação que efetivamente está contribuindo para o resultado seja $C*J$. Este será discutido na seção 5.2.5 Conclusões Parciais do DOE 2.

Ao passarmos ao estudo da variável Média 3, ou seja, o estudo da seção de mais alta frequência, novamente comprovou-se que na medida em que aumentava-se a frequência, a influência dos indutores L1 e L2 é muito mais significativa. Curiosamente, o fator B se mostrou significativo. No entanto, ao fazermos uma inspeção visual do resultado, constatou-se que os tratamentos que contaram com *Choke* tiveram um desempenho muito ruim, às vezes até superando

a nossa base comparativa, que seria a placa sem filtro algum. Como isto contradiz diretamente a suposição teórica do funcionamento deste Choke, e adicionalmente considerando que o mesmo já é utilizado em outros produtos da empresa, a conclusão é que a montagem física do dispositivo acabou por gerar muito mais problemas que solução, com campos interagindo na região onde o mesmo foi colocado. Apresenta-se um detalhe da faixa 3, do tratamento 15, onde o resultado foi insatisfatório para a norma em questão, na Figura 42. Além disso, na Figura 43 mostra-se a montagem física do dispositivo na placa eletrônica, provável causador do problema.

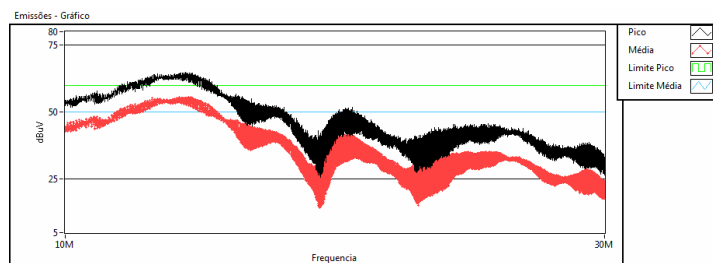


Figura 42 - Trecho de 10MHz a 30MHz do Tratamento 15 do DOE 2



Figura 43 - Detalhe do protótipo com Choke.

5.2.4. Análise do DOE 2 – Detector de Média

Do mesmo modo que no DOE 1, a análise do detector de média não trouxe nenhuma conclusão adicional, concordando completamente com o detector de pico, justificando, portanto, que seus gráficos específicos não sejam apresentados nesta seção.

5.2.5. Conclusões Parciais do DOE 2

Com base nos dados analisados do experimento DOE 2, e com base no conhecimento prévio adquirido, as seguintes conclusões puderam ser obtidas.

O fator que efetivamente conseguiu reduzir o ruído conduzido substancialmente, ao ponto de ser possível o enquadramento do produto na norma CISPR 14-1 [14], foi a introdução do ferrite de modo comum na linha de aterramento do produto. No entanto, como isto já era esperado, o maior achado do experimento foi efetivamente descobrir que o caminho de acoplamento se deu entre a fiação de comunicação entre as placas eletrônicas e a capa metálica do produto. Esta resposta foi obtida a partir da influência significativa do fator de distanciamento da rede de comunicação da chapa metálica e do tamanho da mesma rede, considerando que o acoplamento é capacitivo. Obviamente, nos desenvolvimentos de produtos, nem sempre o tamanho da rede pode ser alterado, visto que ele depende de outras variáveis. No entanto, o uso deste fator no estudo serviu para garantir as conclusões mencionadas. Um pouco mais de detalhe de como a rede elétrica foi afastada da carcaça do produto pode ser visto na Figura 44. Uma calha foi utilizada, e a rede fixada na mesma, garantindo um espaçamento uniforme quando o nível do fator assim pedia. Caso contrário, a rede era fixada diretamente na carcaça metálica.



Figura 44 - Detalhe do meio utilizado para afastar a rede elétrica da carcaça do produto

Esta informação pode ser considerada como uma novidade uma vez que no desenvolvimento de produtos, a disposição fiação dentro do produto, raramente é levada em conta quando se pensa em compatibilidade eletromagnética (historicamente na indústria em questão). Isto

quer dizer que, apesar de em teoria essa disposição da rede ser obviamente associada aos resultados dos ensaios, a indústria estava carente de dados que comprovassem essas afirmações, afim de justificar investimentos na questão.

Além disso, o experimento mostrou que as conclusões para o efeito do *Choke* não são claras, provavelmente devido a sua montagem física. O uso do *Choke* de qualquer forma, exigiria um novo layout da placa eletrônica que poderia mudar os resultados obtidos. Portanto, este fator pode ser considerado abandonado no presente estudo, uma vez que modificações no layout não são desejadas.

Além das conclusões para o ruído de modo comum, com a análise das faixas 2 e 3, nota-se que os indutores L1 e L2 são imprescindíveis, provavelmente servindo na filtragem de ruídos de modo diferencial provenientes do chaveamento da fonte de alimentação.

Um fator que se mostrou significativo na faixa 2, foi a interação C*J. Como é sabido, esta interação se confunde, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Confundimentos do DOE 2. Enfatizado interação C*J

B*F	C*J	K*I	D*E				
B*E	C*K	J*I	D*F				
B*D	C*I	J*K	E*F				
B*I	C*D	J*E	K*F				
B*K	C*E	J*D	I*F				
B*J	C*F	K*D	I*E				
B*C	J*F	K*E	I*D				
F	B*C*J	B*K*I	B*D*E	C*K*D	C*I*E	J*K*E	J*I*D
E	B*C*K	B*J*I	B*D*F	C*J*D	C*I*F	J*K*F	K*I*D
D	B*C*I	B*J*K	B*E*F	C*J*E	C*K*F	J*I*F	K*I*E
I	B*C*D	B*J*E	B*K*F	C*J*K	C*E*F	J*D*F	K*D*E
K	B*C*E	B*J*D	B*I*F	C*J*I	C*D*F	J*E*F	I*D*E
J	B*C*F	B*K*D	B*I*E	C*K*I	C*D*E	K*E*F	I*D*F
C	B*J*F	B*K*E	B*I*D	J*K*I	J*D*E	K*D*F	I*E*F
B	C*J*F	C*K*E	C*I*D	J*K*D	J*I*E	K*I*F	D*E*F

WP - "Whole Plot"
SP - "Split Plot"

Considerando-se que normalmente existe uma hierarquia na significância dos efeitos, é mais provável que a interação mais ativa seja realmente C*J, pode-se tentar entender o que ela significa, através do gráfico de interação dos efeitos, mais detalhado na Figura 45.

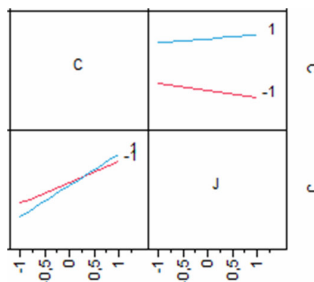


Figura 45 - Interação C*J, no DOE 2

É possível afirmar, a partir da análise do gráfico, que com a presença de L1+L2, a maior distância da rede interface da chapa, diminui o ruído entre 2MHz e 10MHz. Quando tem-se apenas L1, o distanciamento da chapa aumenta o ruído. Ou seja, o fator distancia da chapa, ajuda a reduzir o ruído apenas no caso de os indutores L1 e L2 estarem presentes juntos. Talvez, como os filtros L1 e L2 diminuem o ruído diferencial, a remoção de um deles deixa o cabeamento da interface mais sujeito a este ruído, e como o teste era feito com a rede "por fora", pode ter ajudado a aumentar o ruído diferencial, mesmo diminuindo o acoplamento de modo comum. De qualquer forma, esta análise é apenas superficial, uma vez que seria necessário maior resolução do experimento para definir mais claramente os confundimentos. Além do que, o fator C foi significativo e no nível que indica contribuição para que o distanciamento ajude a reduzir a emissão de ruído.

5.3.O TERCEIRO EXPERIMENTO – DOE 3

Com os experimentos DOE 1 e DOE 2, muito conhecimento foi gerado a respeito dos fatores testados. Alguns fatores como o trançamento do cordão de alimentação puderam ser descartados, e podem ser deixados em segundo plano em futuros projetos. No entanto, considerando um objetivo maior, de através das ferramentas obter uma redução de custo do produto, atacando fatores de menor valor real envolvido (modificar disposição da rede elétrica dentro do produto é mais barato que adicionar um ferrite) , foi decidido realizar um terceiro experimento. Esse experimento tem por objetivo diminuir a quantidade de confundimentos, através do aumento da resolução do experimento, para aumentar o grau de confiança nos resultados anteriores, extrapolar um pouco os fatores de distanciamento da chapa e comprimento da rede, e também permitir um cálculo real do ruído experimental, através do uso de réplicas. No caso do comprimento da rede elétrica, ao invés de colocar uma situação irreal para estudo, a interface foi

mantida na porta do compartimento superior, mas o roteamento dos fios de comunicação foi alterado para reduzir o seu comprimento.

O experimento DOE 3, contou com menos fatores, conforme pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Fatores do DOE 3

Fatores		Níveis (-) (+)		Teorias
A.	Capacitor C10	150nF (atual)		Nao testado
B.	Filtro Modo Comum	Y (Atual, com C71 e C72 + terra)		Estudo da melhor solução do DOE anterior, e uma combinação das duas possíveis.
C.	Indutores Modo Comum	L1+L2 (atual)		Nao testado
D.	Conexão Placa Interface	Porta Freezer - (atual)	Porta Freezer reduzida	Nivel alterado. Tentativa de fazer uma fiação mais curta, porem possivelmente factível, com a fiação passando pela dobradiça intermediária
E.	Roteamento do Cordão de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual		Nao testado
F.	Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual 1 Fan DC		Nao testado
G.	Disposição da rede elétrica dentro da caixa	Afastados da Fonte	Próximos a Fonte	Nao testado
H.	Trançamento do cabo de alimentação	Atual		Nao testado
I.	Trançamento do cordão da interface	Normal		Nao testado
J.	Distanciamento do cabo da interface, da chapa do produto	Cabeamento colado na chapa	Cabeamento distanciado de aproximadamente 4cm da chapa	Com o cordão distanciado da chapa do produto, se o acoplamento capacitivo do ruído de modo comum estiver acontecendo por ali, terems uma diminuição do ruído emitido
K.	Ferrite de Modo Comum	Sem Ferrite	Com Ferrite	Se o ruído predominante é de modo comum, um ferrite na linha de terra pode ser uma solução para reduzir drasticamente o ruído emitido.

5.3.1. Restrições à Randomização – DOE 3

O DOE 3 foi completamente randomizado, do ponto de vista dos tratamentos, pois as 8 placas se ajustam aos 8 tratamentos escolhidos. Entretanto, com a execução de réplicas, executou-se um total de 16 rodadas de experimentos. A árvore de FRD do experimento pode ser vista na Figura 46.

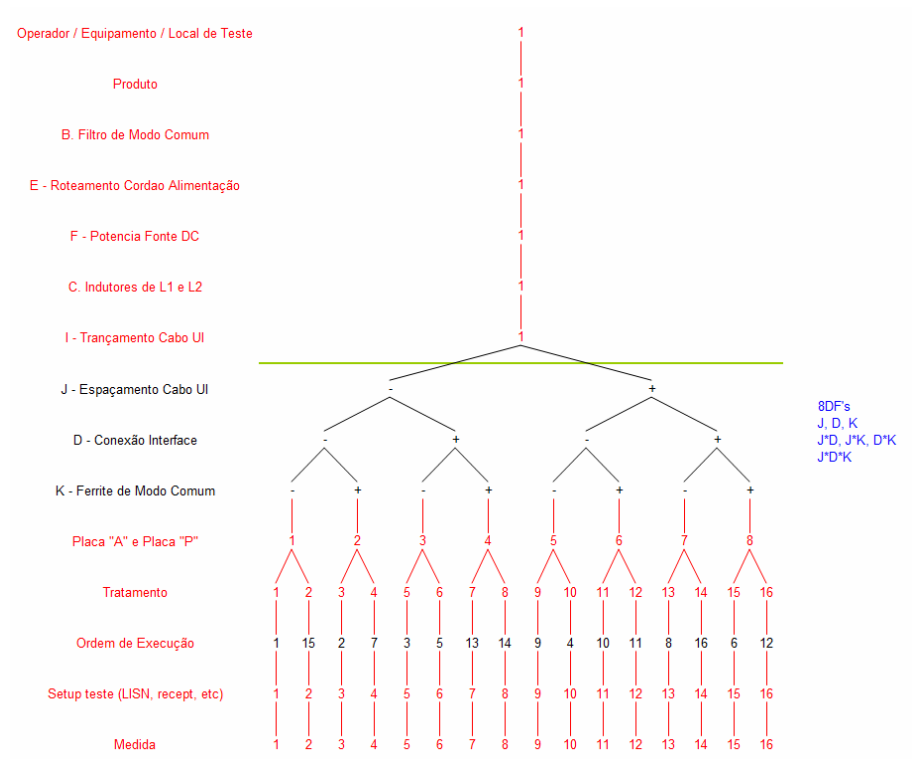


Figura 46 - FRD do DOE 3

5.3.2. Planejamento final do DOE 3

Com o FRD escolhido, o experimento executado obteve uma resolução dita infinita, ou *Full*. Esta resolução simplesmente quer dizer que não existem confundimentos, e existem graus de liberdade suficientes para estimar o efeito de todos os fatores.

Além disso, a escolha da réplica permite o cálculo de um erro experimental, garantindo assim uma melhor estimativa da significância dos fatores, uma vez que o erro não mais é calculado a partir dos fatores de menor efeito, mas sim a partir da variação das próprias réplicas. A representação do experimento segue abaixo:

$$2^3_{FULL}$$

(5-3)

Durante a execução deste experimento, o espaçador foi aumentado, para garantir aproximadamente 4 cm de distancia entre a rede e a chapa do produto, que é também um número estimado de espessura do Poliuretano no produto (limite para implementação real).

Outro detalhe importante do DOE 3 é que, uma vez que a seção ainda com mais alto ruído era a de baixas frequências, os ensaios foram realizados com foco na mesma. Ou seja, o ensaio não seguiu até 30MHz, o que nos permitiu ganharmos tempo de experimentação.

5.3.3. Análise do DOE 3 – Detector de Pico

A análise de experimentos replicados, além das etapas já utilizadas, pode se valer de estudos que usem ANOVA (técnica de Análise de Variância). Este procedimento compara estimativas de variância para cada fonte de variação. Além disso, ele fornece um mecanismo para executar testes de significância estatística para cada fonte de variação no experimento. No caso deste experimento, o mais importante no que diz respeito a esta técnica é a quantificação do ruído e a determinação do efeito dos fatores em face do ruído experimental.

A ANOVA calcula a variância do modelo e do erro, através do cálculo da Soma dos Quadrados (*Sum of Squares* ou SS) e do cálculo da Média dos Quadrados (*Mean Square* ou MS). A Soma dos Quadrados descreve a variação associada ao modelo, erro ou fator. Esta estatística não se ajusta quanto aos graus de liberdade, e, como pode-se ver em MONTGOMERY e RUNGER [26], o estimador não tendencioso de σ^2 é a Média dos Quadrados, que nada mais é do que a Soma dos Quadrados dividido pelo número de graus de liberdade. Ou seja, a média dos quadrados também descreve a variação associada, mas se ajusta aos graus de liberdade do experimento.

$$SS = \sum_j \sum_i (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (5-4)$$

$$MS = \frac{\sum_j \sum_i (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1} \quad (5-5)$$

Com estas estimativas de variação, aplicadas aos fatores do experimento e ao erro experimental (extraído das réplicas), é possível comparar os dois para atestar a significância dos fatores testados em vista do erro.

O procedimento inicial de análise do DOE 3, ainda segue a estrutura dos DOEs anteriores. A análise prática é essencial, já que a experimentação não substitui a boa engenharia,

mas age apenas como um catalisador para a correta tomada de decisões. Como de costume, iniciou-se a análise do DOE pela Média da Faixa 1, utilizando o detector de Pico.

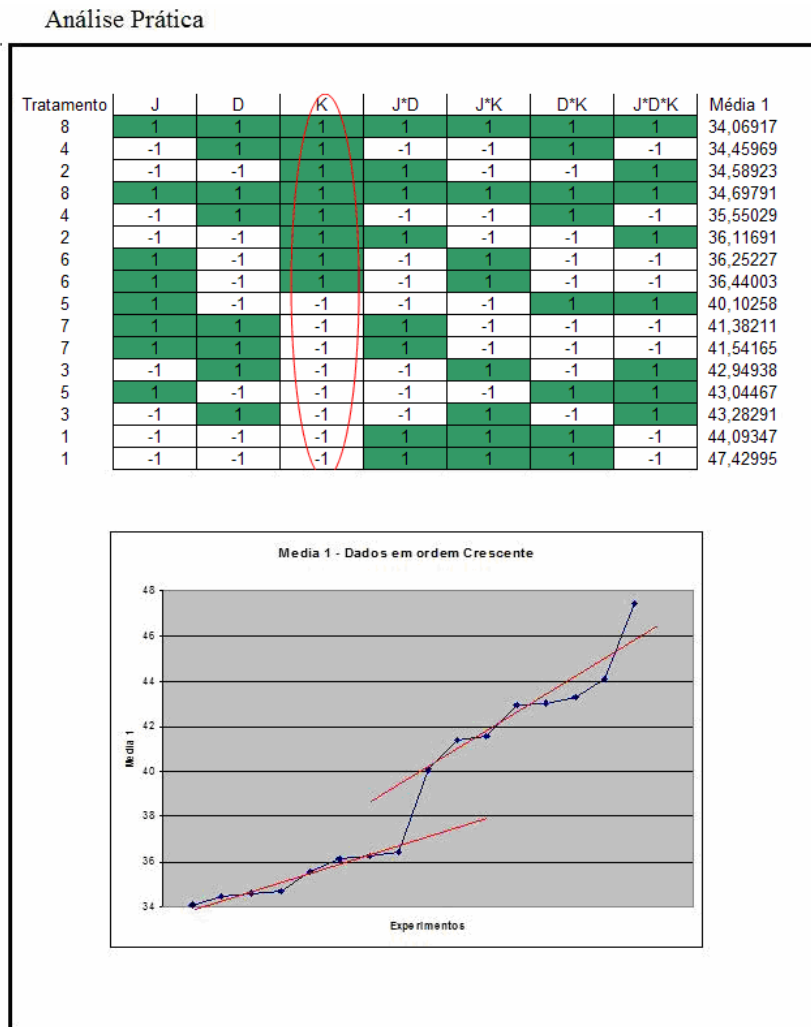


Figure 47 - Análise Prática. Média 1 – Detector de Pico – DOE3

A análise prática mostra fortemente a presença do ferrite para reduzir o valor da variável de resposta. Também é possível notar claramente que, quando o mesmo se faz presente, o efeito das outras variáveis é muito menor, uma vez que este já está sendo uma grande barreira para o ruído de modo comum.

Análise do experimento CRD - DOE 3

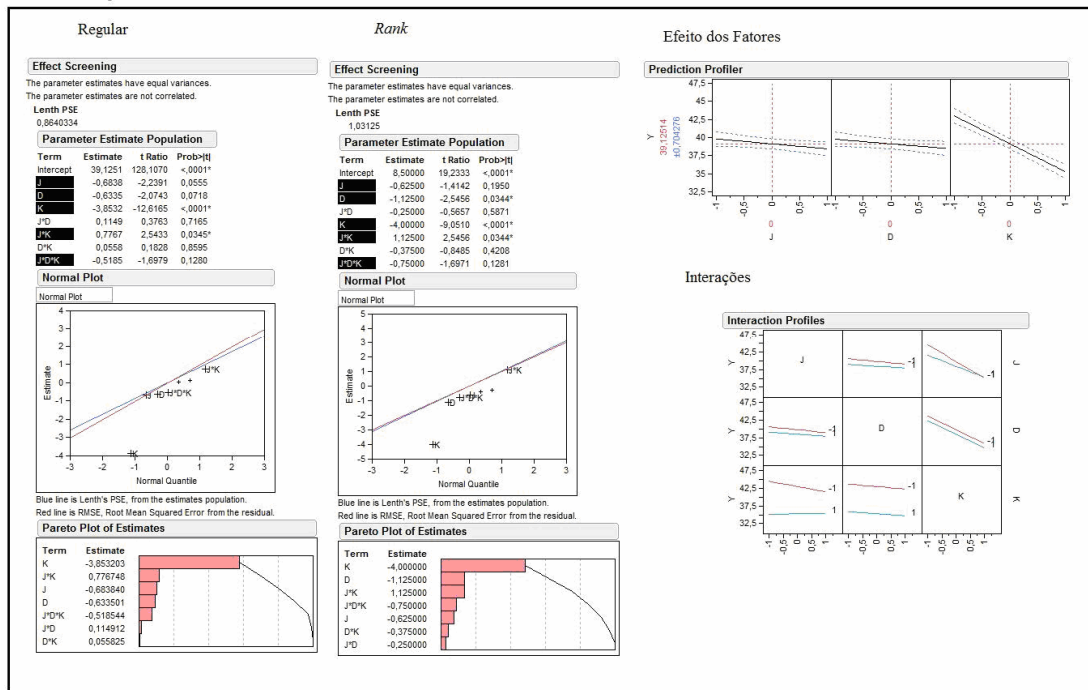


Figura 48 - Análise Gráfica. Média 1 – Detector de Pico - DOE 3

Utilizando o gráfico de probabilidade normal e o gráfico de efeito dos fatores, comprovou-se que todos os fatores são considerados ativos e se sobressaem aos ruídos do experimento. As análises regular e de *Rank* não discordaram, o que indica que não houve indícios claros de causas especiais afetando o experimento. Apenas as interações J*D e D*K não mostraram significância.

Esses dados corroboram as conclusões dos experimentos anteriores, e tornam os fatores de espaçamento e tamanho da rede elétrica da interface efeitos ativos e importantes na determinação de quanto ruído conduzido existe no ensaio de compatibilidade.

Partindo para a análise de variância (ANOVA), foi visto que os fatores, representados na Tabela 12 pela variância do MODELO (*Model*), se sobressaíram aos ruídos, com um *F-Ratio* muito alto. O *F-Ratio* é a proporção da média dos quadrados do modelo e da média dos quadrados do erro. Quanto maior é este número, melhor o modelo representa o resultado, com menor influência do erro.

$$F - Ratio = \frac{MS_{\text{modelo}}}{MS_{\text{erro}}} \quad (5-6)$$

A partir do *F-Ratio* calcula-se a probabilidade de obtermos os resultados do experimento ao acaso na “natureza”. A partir do valor dessa razão, é possível calcular a probabilidade de que ela ocorra, utilizando uma distribuição do tipo F. Esta probabilidade se chama de *p-value*. Ou seja, este valor se assemelha muito ao erro tipo I [27], que é o erro de assumir que um fator é significativo, quando na verdade não é. Em outros termos, um valor baixo desta probabilidade (*p-value*) atesta que os fatores são mais significativos que o ruído do experimento.

Tabela 12 - ANOVA - Média 1 com detector de Pico. DOE 3. Gerado por JMP®

Analysis of Variance				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	7	265,67484	37,9535	25,4312
Error	8	11,93922	1,4924	Prob > F
C. Total	15	277,61406		<,0001*

Na Tabela 12, ficam claros os 7 graus de liberdade associados aos fatores, e 8 graus de liberdade que foram gerados pela execução de réplicas. A média dos quadrados do modelo ficou em 265 aproximadamente, e a do erro em menos de 12. A razão dos dois mostra o grau de ajuste do modelo frente ao erro, e é visto na seção de *F-Ratio* da tabela.

Com os resultados mostrados na Tabela 12, fica claro que realmente os fatores escolhidos se sobressaem aos ruídos do experimento. Nesses ruídos do experimento, estão incluídas as diferenças de placas, ferrites, montagens do produto e arranjos do ensaio. Uma vez que os fatores que formam o modelo são adequados, a partir de uma regressão, é possível criar-se uma fórmula que represente o resultado. Esta fórmula é criada a partir do valor dos efeitos calculados. A formula foi dividida em duas, por motivos de formatação, e está mostrada nas equações 5-8 e 5-9.

Pode-se ver o quanto esta fórmula se aproxima do modelo, a partir de um gráfico com Y sendo o valor previsto, e X sendo o valor real. Além disso, percebe-se o quanto o modelo efetivamente representa a realidade, a partir do cálculo de R², que nada mais é do que a medida da proporção de variação em torno da média explicada pelo modelo linear gerado. A variação remanescente é atribuída a erro aleatório. Se R² (ou *Rsquare*) é igual a 1, o modelo representa perfeitamente os dados. A sua equação é representada em 5-7.

$$R_{square} = \frac{SS_{modelo}}{SS_{Total}} \quad (5-7)$$

Este gráfico é mostrado na Figura 49.

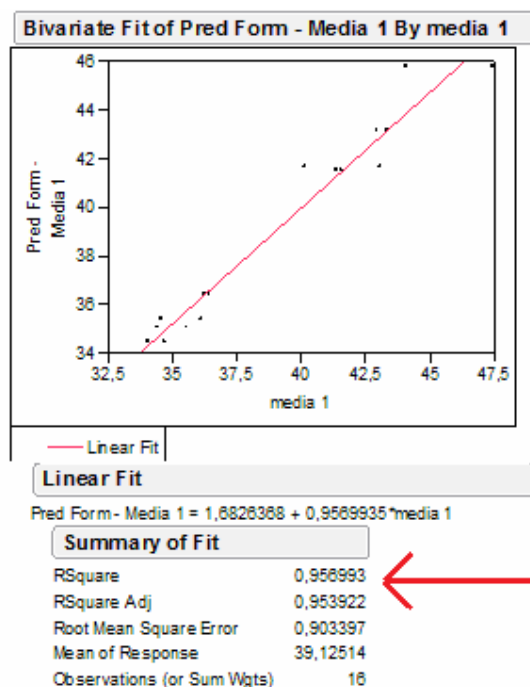


Figura 49 - Gráfico de Ajuste da Fórmula Prevista para Média 1 - Pico. Gerado por JMP®

O gráfico acima mostra no eixo Y o valor previsto da variável Média 1 do detector de pico, através da fórmula, e no eixo X tem-se o valor real (medido). A relação linear que pode ser vista através da reta vermelha mostra que o modelo se ajusta bem aos dados. Além disso, vê-se que existe 95% de ajuste do modelo (*RSquare*) para os dados reais, validando assim as equações geradas em 5-8 e 5-9.

Com a equação de previsão, supondo que não deseja-se adicionar o ferrite no produto, é possível calcular o nível dos outros fatores, para que se obtenha um dado valor de ruído conduzido médio na faixa 1. No entanto, como é sabido, reduzir o ruído médio não é garantia de obtenção de aprovação na norma, fazendo-se necessário analisarmos outra variável.

Para obtermos melhores conclusões da faixa 1 do detector de pico, deve-se analisar a variável Máximo 1. Para essa variável de resposta, o ferrite também foi o fator mais significativo, e as conclusões a seu respeito seguem as conclusões da Média 1. No entanto, quando analisa-se os gráficos de probabilidade normal e Pareto para essa variável de resposta, nota-se uma significância maior para a distância da rede e chapa (J), e ainda se vê que também que o comprimento da rede de comunicação (D) acaba por não ser um fator significativo. Ainda assim, como interações que envolvem D são significativas, o mesmo ainda será mantido no modelo gerado.

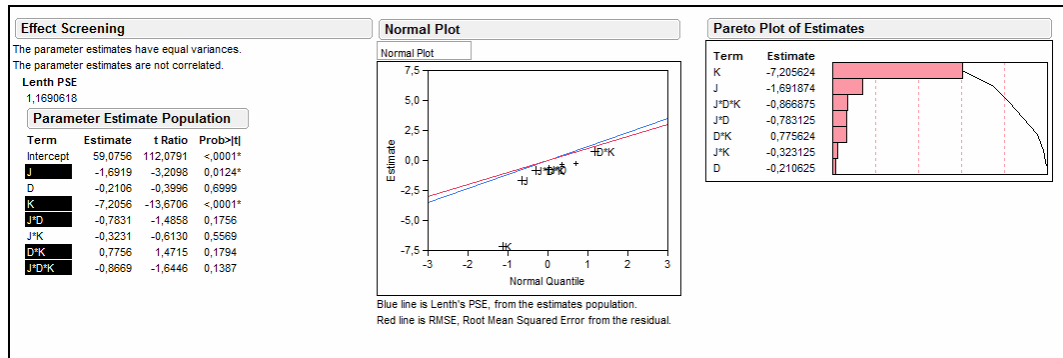


Figura 50 - Análise Gráfica - Máximo 1 com detector de Pico. Gerado por JMP®

Como pode-se ver, o ferrite ainda é de longe o fator que determina em quanto ter-se-á o valor máximo, com um efeito calculado de 7dbμV na sua presença. Fora isso, conforme era desejado, pode-se criar a partir do modelo, a equação de previsão, a partir dos fatores estudados. Incluiu-se o fator D, devido as interações D*K e J*D*K terem sido consideradas significativas. Assim sendo, a fórmula obtida, com todos os fatores, para o Máximo valor da faixa 1 é:

$$Y_{previsto} = 59,07 - 1,69 * J - 0,21 * D - 7,20 * K + Y_{int} \quad (5-8)$$

$$Y_{int} = -0,78 * J * D - 0,32 * J * K + 0,77 * D * K - 0,87 * J * K * D \quad (5-9)$$

Essas fórmulas mostram um alto grau de concordância com o resultado obtido, com 96% de ajuste aos dados. Isto quer dizer que os fatores são robustos ao ruído e representam muito bem o ocorrido no experimento. Notam-se essas observações na Figura 51.

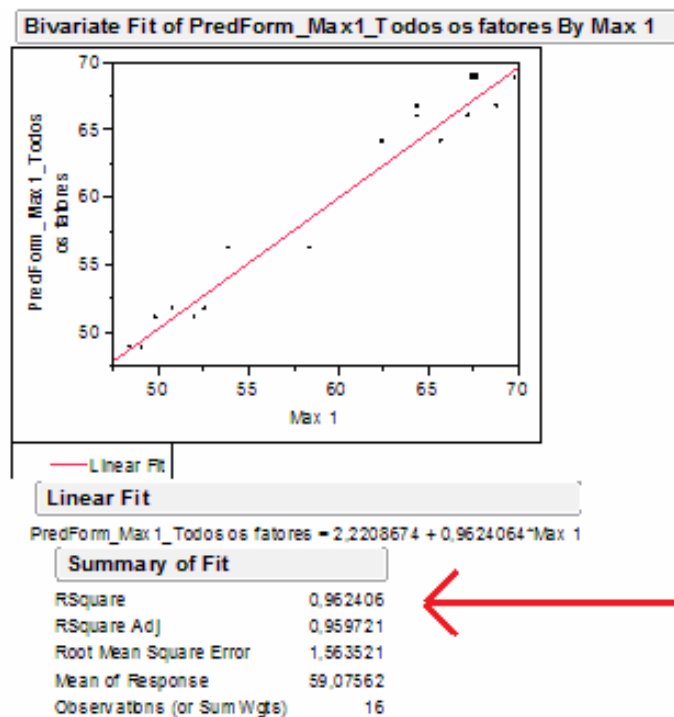


Figura 51 - Gráfico de Ajuste da Fórmula Prevista para Máximo 1 - Pico. Gerado por JMP®

Uma vez que, observando os dados coletados para o Máximo 1, notou-se que a frequência exata em que ele ocorre não é fixa, não foi possível dizer exatamente qual o Y máximo desejado. Apenas a título de teste, como a norma de Quasi-pico começa em 66 e decai logaritmicamente até 56, e lá se estende por vários MHz, considerando que maioria dos máximos ocorreu na faixa de 0,15 a 0,5MHz, pode-se checar quais os níveis dos fatores ajustar, para a condição de:

Y máximo da faixa 1 = 61dbμV

Fator K = Sem ferrite

Fator D = Porta Freezer Reduzida

Com esses dados de entrada, para chegar a 61dbμV, foi necessário levar o Fator J até:

Fator J = 8,4cm

Esse valor foi gerado, utilizando a equação com dados de entrada -1 para K e +1 para D. A menor saída que se aproxima dos 61dbμV acontece com J = 3,32, aproximadamente. Isto é obviamente uma extrapolação do resultado da equação, e necessitaria outro experimento, uma vez que não é certo que o fator tem um comportamento linear, e se este não for o caso, a curvatura da variável de resposta deve ser conhecida para estimar qual o valor adequado da distância da fiação da capa metálica.

5.3.4. Análise do DOE 3 – Detector de Média

Do mesmo modo que no DOE 1 e 2, a análise do detector de média não trouxe nenhuma conclusão adicional, concordando completamente com o detector de pico, e portanto seus gráficos específicos serão poupados nesta seção.

5.3.5. Conclusões Parciais do DOE 3

O fator K novamente foi o grande responsável pelo enquadramento do produto na norma. Nos níveis testados, os outros fatores não foram capazes desse feito. A análise utilizando ANOVA mostrou que os fatores representam bem a realidade, com um p-value insignificante.

O trabalho mostrou que, dentro das condições ensaiadas, apenas o ferrite e a presença dos indutores L1 e L2 foram efetivamente capazes de garantir aprovação na norma

5.4.CONCLUSÃO

Ao todo foram conduzidos 3 experimentos planejados. Os mesmos geraram um total de 64 ensaios individuais, contabilizando apenas os ensaios oficiais, sem considerar os inúmeros testes executados para familiarização com o equipamento e normas. Com os resultados dos experimentos, pôde-se quebrar alguns paradigmas, como a questão da eficácia do trançamento do cabeamento (fator H) e a disposição dos condutores ao entrar na caixa (fator G), e pôde-se também fazer algumas descobertas interessantes, como a teoria criada de que o acoplamento do ruído de modo comum se faria entre a fiação interna do produto e a carcaça.

O pensamento sequencial através dos experimentos garantiu confiança nos resultados obtidos, classificando o ruído principalmente como sendo de modo comum, e seu acoplamento sendo principalmente via cabeamento interno do produto e a carcaça metálica do mesmo. A utilização do ferrite na linha de aterramento foi a medida mais eficaz, mas é sabido também que isto implica em questões de outras normas, principalmente de segurança, além de custos altos para o produto, uma vez que o mesmo é uma peça feita manualmente.

O trabalho apontou uma possível solução de afastar a rede elétrica da carcaça, reduzindo assim o acoplamento mencionado, evitando assim o uso do ferrite. Uma extrapolação mostrou uma distância possível, mas como a teoria mostra, provavelmente esta relação de ruído acoplado e distância entre as partes não deve ser linear, exigindo assim uma comprovação. Esta solução não

pôde ser validada durante a execução deste trabalho, pois exigia um produto criado especificamente com a rede injetada interna, apropriada aos testes, uma vez que fazer o arranjo manualmente seria de um esforço gigante. Não foi possível a criação deste produto especial em tempo hábil.

De forma geral mostrou-se como as ferramentas de Seis Sigma, em especial o DOE, onde pode-se ver não só efeitos individuais de fatores, como também interações entre os mesmos, podem ser altamente aplicados em ensaios de compatibilidade, trazendo diversos benefícios.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma maneira de aplicar as ferramentas da metodologia Seis Sigma, em um caso de compatibilidade eletromagnética. O produto e o sistema forma estudados utilizando-se ferramentas de Mapa de Raciocínio e Mapa de Produto. Foram apresentados 3 experimentos planejados que foram executados (DOEs), e permitiram a aquisição de grande conhecimento a respeito dos fatores que influenciam o resultado de testes de Emissão Conduzida, em refrigeradores de duas portas *No-frost*. As conclusões parciais de cada experimento, através de um raciocínio sequencial, foram se confirmando e expandindo o aprendizado sobre o ruído emitido por esses produtos.

Os ensaios foram feitos utilizando-se apenas um refrigerador, o que limita nosso espaço de inferência a esse produto em questão, para apenas o produto sob teste, e apenas uma tensão. Novos experimentos com outros produtos, utilizando a estrutura já comentada de Blocagem, poderiam fornecer aos pesquisadores informações mais robustas sobre o desempenho dos fatores em escala produtiva, ao entender variações de produto para produto, relativo aos efeitos dos fatores além de um maior entendimento do efeito da tensão, que inclusive poderia ser tratada como um fator em um experimento planejado, nos resultados dos ensaios de compatibilidade.

6.2. CONCLUSÕES

Uma vez que a premissa inicial do trabalho era não modificar a fonte de alimentação atual do controle Apollo, vários fatores de filtragem externos ao controle foram testados, bem como itens do próprio produto em si, que nunca haviam sido experimentados na empresa Whirlpool®. A união de todos esses fatores em experimentos fatoriais fracionados permitiu não só um entendimento individual de cada um dos fatores envolvidos, como um maior conhecimento da interação dos mesmos.

A partir do 1º experimento, concluiu-se que uma grande parcela do ruído era de modo comum, acoplando-se pelo terra, uma vez que as medidas de redução de modo diferencial foram pouco eficazes na minimização geral do ruído conduzido. Esse experimento também, a partir da execução da técnica de Repetição, permitiu uma avaliação preliminar do Sistema de Medição, sendo que isto considera não só os equipamentos em si, como o arranjo do ensaio e as variáveis de resposta. Esta informação serviu para determinar quais variáveis de resposta seriam utilizadas no estudo.

Utilizando os dados e análises do 1º DOE, o segundo experimento foi planejado de forma a tentar confirmar o efeito de alguns fatores sobre os quais ainda restavam dúvidas, e além disso, aproveitou-se para incluir novos fatores, que foram levantados durante uma análise de engenharia do produto, considerando-se as teorias criadas a partir do experimento prévio. Isto mostra também que as ferramentas estatísticas não são uma solução milagrosa a problemas de engenharia, mas um catalisador de boas idéias e raciocínio críticos, que aliados ao conhecimento do problema, levam as melhores soluções. O 2º DOE ajudou a diagnosticar um problema de montagem criado na adição do filtro *Choke* (fator B), além de confirmar o fator Indutores com sendo significativo o uso de 2 deles, para as frequências acima de 2MHz, mostrando alguma influência de ruído diferencial nessa faixa.

Novamente, o raciocínio sequencial levou o trabalho a gerar um entendimento maior dos fatores que foram estudados no 2º DOE. Com isto, foi decidido executar um experimento com réplicas que basicamente evita a quantificação do ruído a partir de dados dos fatores, uma vez que neste estágio do estudo, estima-se que todos sejam ativos. Este experimento permitiu garantir que os fatores analisados eram robustos aos ruídos experimentais do sistema, uma vez que a sua quantificação através das réplicas foi possível. Com os dados coletados, foi gerada uma equação de previsão dos dados, com a qual uma extrapolação foi gerada estimando qual seria a distância necessária da rede elétrica do produto da chapa para evitar o uso do ferrite.

De forma geral foi concluído a partir dos 3 experimentos que o maior ruído conduzido emitido pelo produto na sua condição atual, era constituído de ruído de modo comum. Seções de maior frequência foram afetadas por ruído diferencial, mas nada que impedisse a aprovação em norma, o que gerou um grande foco então na primeira faixa de interesse, de 148,5kHz a 2MHz. A partir da determinação de que este tipo de ruído era a maior parcela, fatores como distância da rede de comunicação da chapa metálica, adição de ferrite na linha de aterramento, roteamento do cordão de alimentação, entre outros, foram testados.

Após finalizar a execução do último experimento, obteve-se algumas conclusões a respeito do produto:

- Os fatores testados se sobressaíram aos ruídos experimentais;
 - Conclusão obtida a partir o uso de réplicas, e a quantificação do ruído utilizando o método ANOVA;
- O único fator capaz de enquadrar o sistema na norma foi a adição do ferrite na linha de aterramento, como já está implementado em produção atualmente;
 - Mesmo considerando o custos envolvidos, sem atacar a fonte geradora do ruído, foi a única medida de filtragem capaz de conter o ruído emitido;
- Fatores desconhecidos antes dos experimentos, como a distância da rede de comunicação da chapa metálica externa e o comprimento desta fiação, mostraram-se significativos, e não deveriam ser ignorados nos projetos de novos produtos;
 - Ainda assim, estes fatores sozinhos, não foram suficientes para enquadramento na norma.
- Uma extrapolação foi feita, levando a crer que, caso o efeito da distância da rede elétrica seja linear, é possível a obtenção de níveis satisfatórios de ruído máximo conduzido na faixa 1, dentro da norma
 - Esta extrapolação foi feita, a título de referência, uma vez que a relação entre distância e acoplamento elétrico é ser linear;
- Não foi comprovada a execução prática na fábrica da solução proposta, visto que isto demandaria testes em um produto criado especificamente para este fim
 - A rede elétrica dos refrigeradores, como já mencionado, fica dentro do mesmo, imersa em Poliuretano, o que dificulta muito a sua movimentação depois de se ter o gabinete injetado.

6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O uso das ferramentas no presente trabalho, acabou por se valer de artifícios matemáticos como a divisão da faixa espectral em faixas, cálculo de médias e a busca do valor máximo por faixa. Como foi constatado, no produto em estudo, essas variáveis foram adequadas, mas não há garantias de que o serão em qualquer caso. Além disso, a extrapolação dos resultados, para condições de produção, além de confirmação da causa geradora do ruído, são itens não plenamente discutidos neste trabalho. Com base nisto e em outras considerações, algumas propostas de estudos seguem:

- Aplicação das ferramentas Seis Sigma na determinação da fonte geradora do ruído, em controles eletrônicos de refrigeração
 - Isto inclui o trabalho em fontes chaveadas especificamente
 - É um trabalho conjunto entre Eletrônica de Potência e Compatibilidade Eletromagnética
- Aplicação das ferramentas Seis Sigma, em ensaios de Emissão Radiada (e demais ensaios de compatibilidade)
 - Isto pois em cada ensaio, diferentes variáveis de resposta podem ser medidas.
 - Em ensaios de susceptibilidade o desafio pode ser maior, uma vez que não é medido um ruído, mas geralmente é feito um teste do tipo passa ou não passa.
- Estudos de aplicação produtiva da efetividade dos fatores de produto, com a determinação da variabilidade de produção, com relação aos ensaios mencionados
- Estudo de um ambiente de trabalho que facilite a criação de experimentos planejados mais otimizados, de forma a, baseado em algum banco de dados de conhecimentos adquiridos, ajude o engenheiro a focar em alguns fatores potenciais em significância.
- Uso de ferramentas mais avançadas de DOE, como o Método de Modelagem de Superfície, ou *Surface Response Method*. Estes métodos tentam modelar a variável de resposta de uma forma mais complexa que apenas a linear, como utilizada neste estudo

A quantidade de opções que se abre ao comprovar que a metodologia Seis Sigma se aplica é muito grande. Essa metodologia ajuda muito o profissional que possui conhecimento no assunto, no caso em Compatibilidade Eletromagnética, quando o mesmo se depara com situações práticas de difícil modelagem matemática, principalmente quando se está estudando ambientes produtivos, onde as variações são muito mais percebidas.

A metodologia Seis Sigma tem um longo caminho a trilhar quando se fala de Compatibilidade Eletromagnética.

ANEXO 1 – ARRANJO DOS ENSAIOS

Os ensaios de radiação conduzida foram executados no Laboratório MagLab – Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética –, situado no Campus Universitário da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis – SC. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as normas pertinentes, já supracitadas, CISPR 14 [14] e CISPR 16 [15].

O MAGLAB conta com uma sala fechada blindada, dotada de planos de terra verticais e horizontais, *Receiver* (R&S ESPC, de 9kHz a 2500kHz), limitador de transientes (R&S ESH3-Z2), LISN (R&S ESH3-Z5, de 9kHz a 30MHz), além de microcomputador para gravação dos resultados.

Os principais requisitos a serem atendidos de acordo com as normas são:

1. Distância do EUT de 0,5m de qualquer parede
2. Distância do EUT de 0,8m para a LISN
3. Distância de 10cm do EUT para a o plano de terra horizontal
4. Cabos em um feixe (já que o cordão do produto é maior que os 80cm supracitados), entre 0,3m e 0,4m

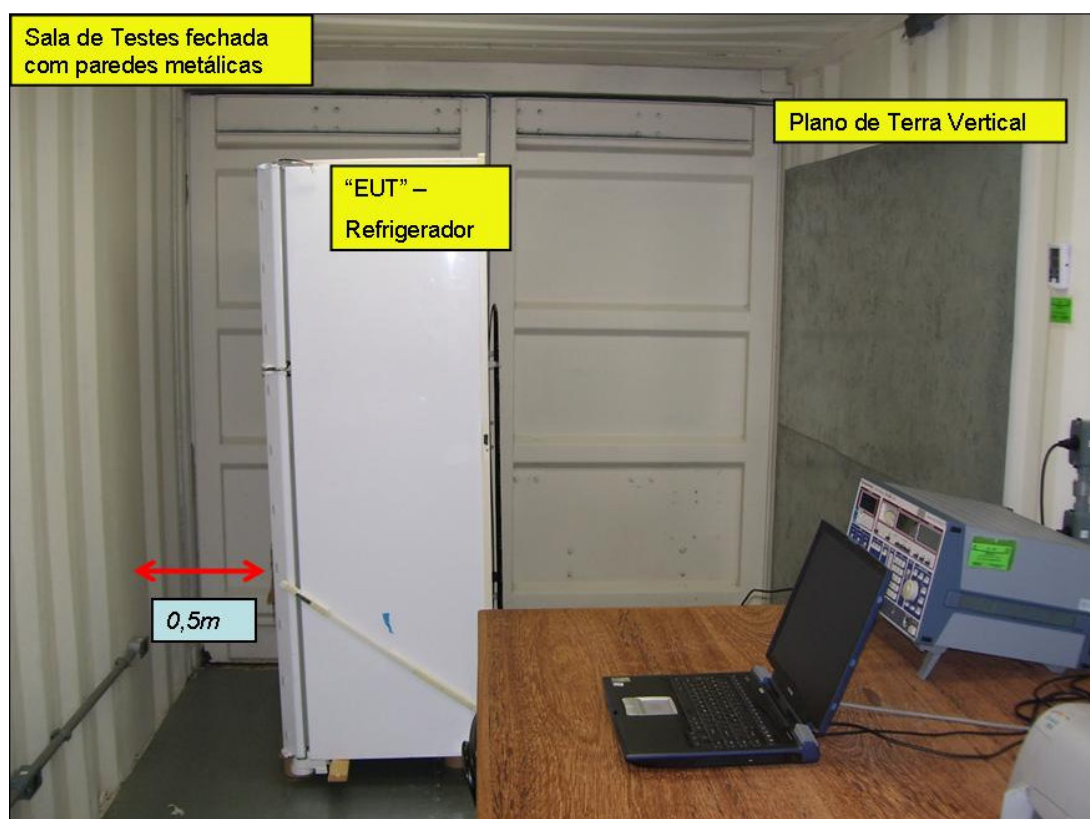


Figura 52 - Câmara de Testes

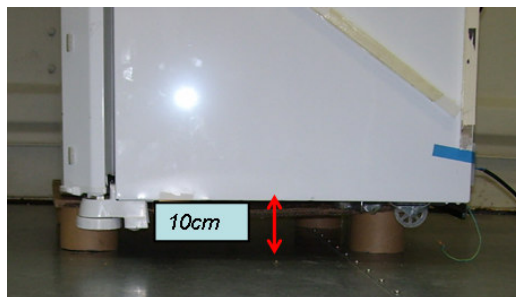


Figura 53 - Distância do produto ao chão

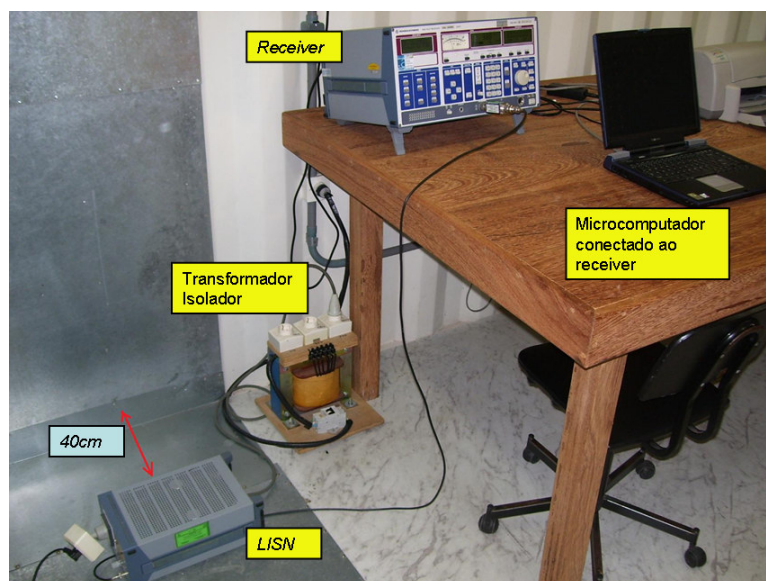


Figura 54 - Equipamentos de Ensaio

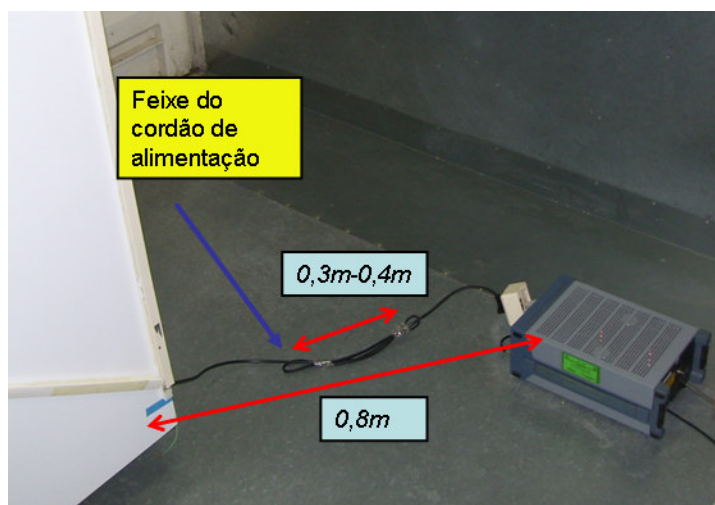


Figura 55 - Arranjo do cordão de alimentação

ANEXO 2 – MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR

MAPA DE PRODUTO DO REFRIGERADOR “NO-FROST” BRX-49

Para categorizar os fatores possíveis de serem estudados para a abordagem do problema, um Mapa de Produto do refrigerador foi criado, visando ajudar o pesquisador a identificar onde e como trabalhar.

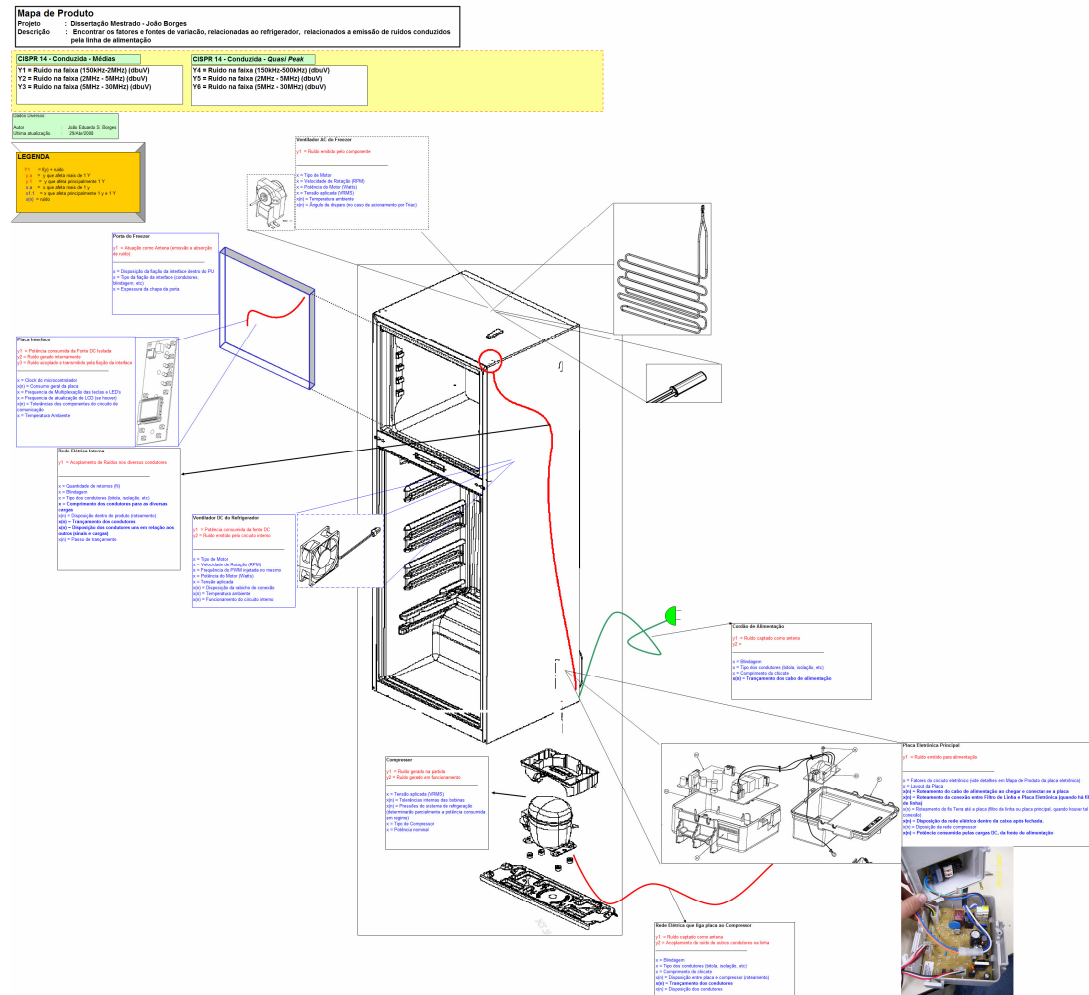


Figura 56 - Mapa de Produto do Refrigerador - Visão Geral

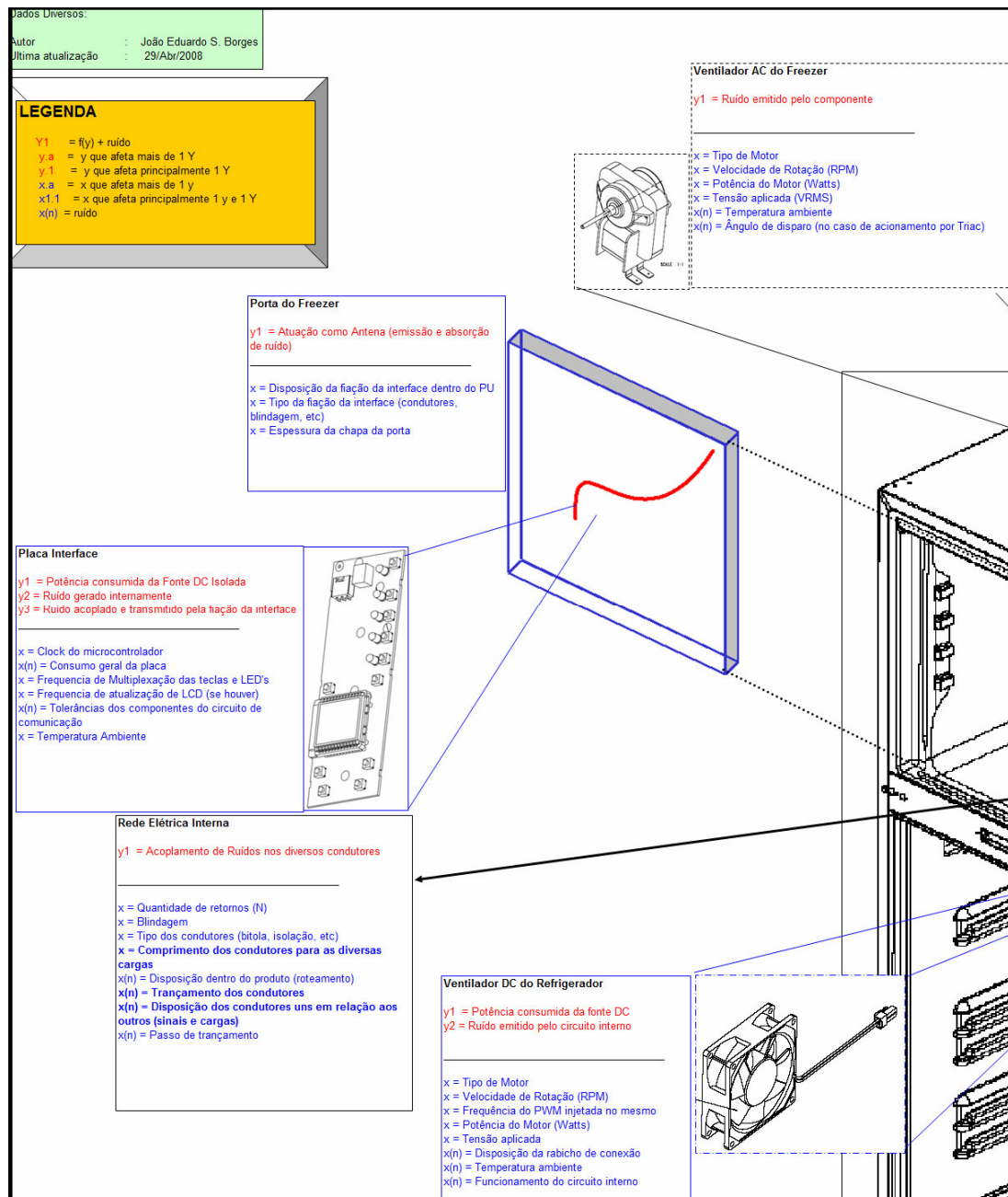


Figura 57 - Mapa de Produto do Refrigerador - Detalhes de Cargas

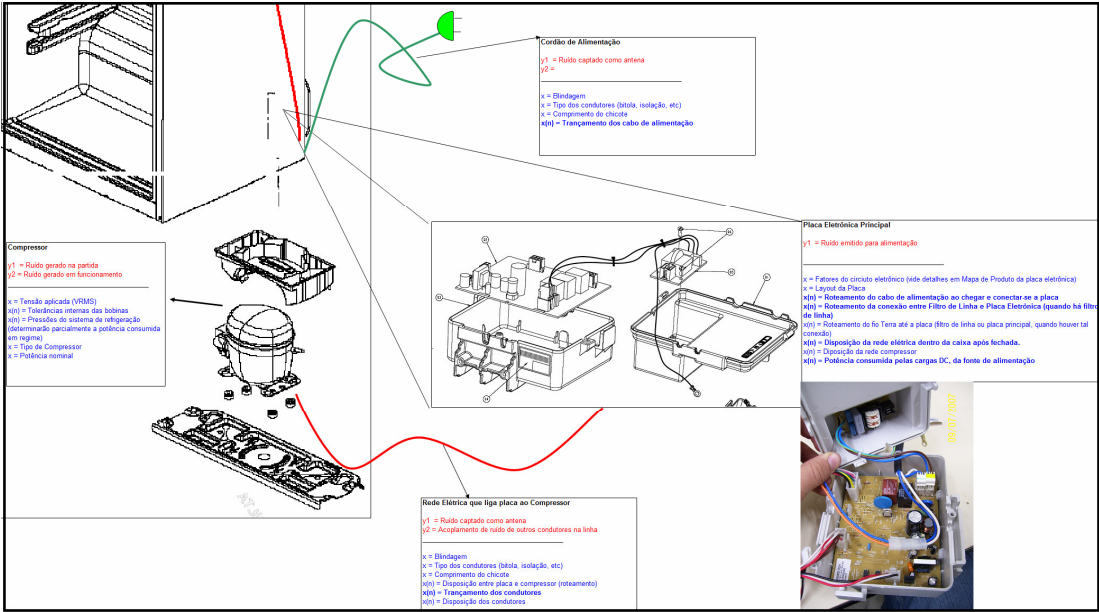


Figura 58 - Mapa de Produto do Refrigerador - Detalhe do Controle Eletrônico

ANEXO 3 – MAPA DE PRODUTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

MAPA DE PRODUTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Além de trabalhar realizando um Mapa de Produto do Refrigerador como um todo, um trabalho extra foi requerido para entender melhor a fonte de alimentação do controle eletrônico do produto, mais atento à entrada principal. Além de mapear a fonte de alimentação do controle, também foi mapeado um filtro de linha típico, para possível uso de suas características como fatores para testes. Isto quer dizer, como na fonte de alimentação do próprio produto não há por exemplo um indutor com núcleo comum, o mapeamento de um filtro de linha típico poderia acrescentar estes fatores faltantes.

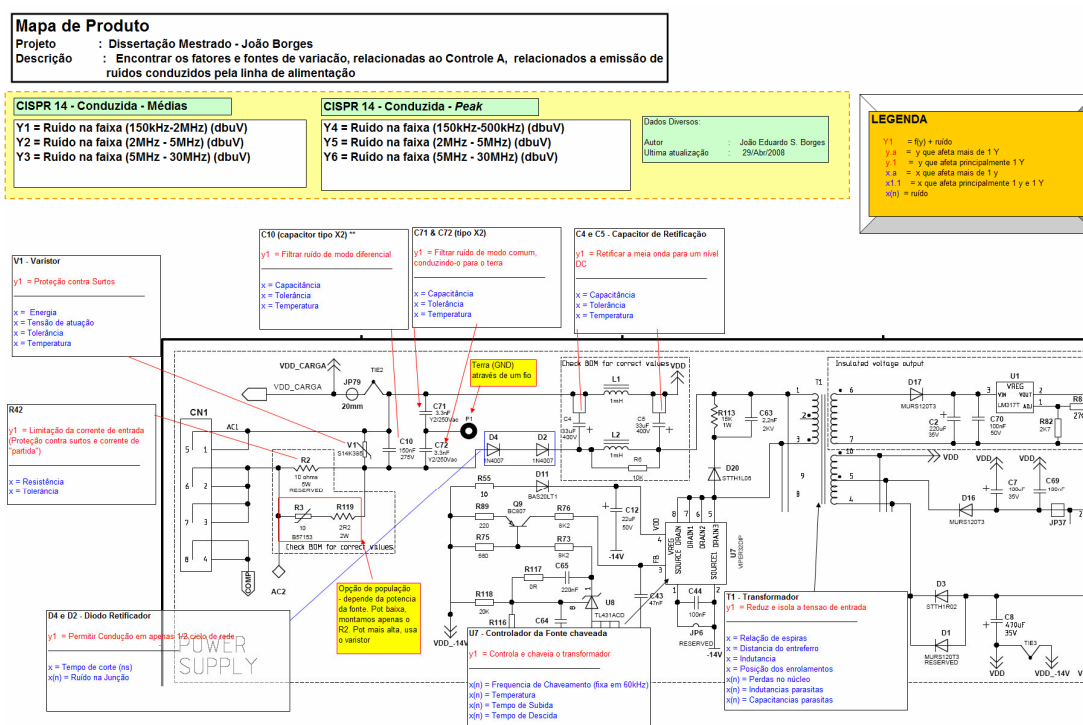


Figura 59 - Mapa de Produto da Fonte de alimentação

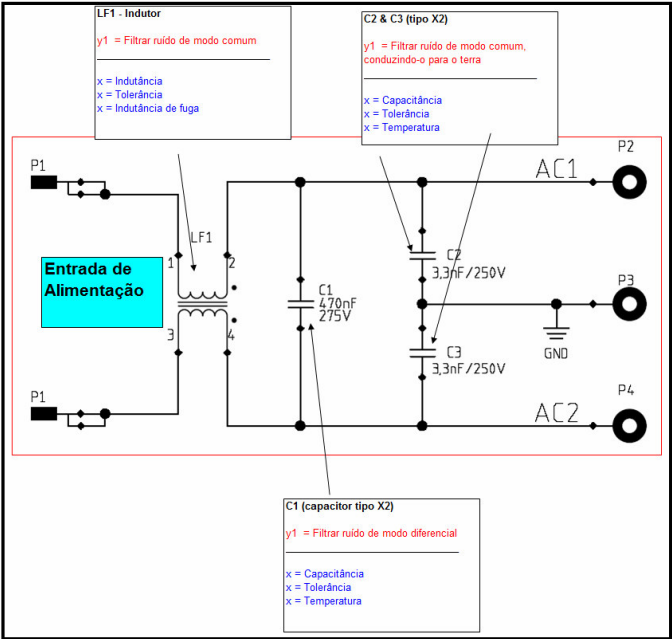


Figura 60 - Mapa de Produto de Filtro de Linha

ANEXO 4 – PLANEJAMENTO DOS DOES

Formulário de Planejamento DOE 1																																																																																																																																																																																																																			
1) Objetivo: Este DOE tem por objetivo identificar fatores significativos em emissão de ruído conduzido, no teste de Emissão Conduzida (CISPR 14). Neste DOE temos incluídos alguns fatores de produto (facilmente manipuláveis) e alguns fatores da placa (locando nos filtros de entrada de energia).																																																																																																																																																																																																																			
2) Informações anteriores: Durante a execução deste estudo, nenhum DOE foi realizado até agora, sendo este o primeiro. Apenas foi realizada uma tentativa de execução de um COWMSE com peças de produção, da placa "T" no caso. Neste estudo, as variáveis de resposta inicialmente escolhidas não se mostraram adequadas a serem utilizadas para aquele propósito. Na execução deste DOE, elas serão utilizadas, pois a priori entendemos que uma vez que estas avaliações variando fatores que acreditamos terem influência significativa no ruído emitido pela placa, as respostas possam passar a ser adequadas. Ou seja, dentro da estrutura do experimento estamos realizando algumas medidas mais de uma vez, para tentar obter uma avaliação do sistema de medição, aplicado ao DOE.																																																																																																																																																																																																																			
3) Estratégia experimental e variáveis : Z_{eff}, R^2, k_d																																																																																																																																																																																																																			
Variáveis de Resposta					Técnica de Medição																																																																																																																																																																																																														
Y1.1 - Média - Faixa A (150kHz - 28MHz)					Medição do Ruído conduzido, conforme CISPR14. <i>Separação da faixa de interesse, e cálculo matemático da média</i>																																																																																																																																																																																																														
Y1.2 - Média - Faixa B (2MHz - 10MHz)					Idem anterior																																																																																																																																																																																																														
Y1.3 - Média - Faixa C (10MHz - 30MHz)					Idem anterior																																																																																																																																																																																																														
Y2 = Máximo por faixa					Identificação do pico por faixa																																																																																																																																																																																																														
Fatores			Níveis (-) (+)	Teorias																																																																																																																																																																																																															
A.	Capacitor C10	150nF (atual)	470nF ("")	Capacitor de filtro de modo diferencial. Este capacitor tem a função de evitar que ruidos em modo diferencial entrem ou saiam da placa eletrônica.																																																																																																																																																																																																															
B.	Filtro Modo Comum	Y (Atual, com C7 e C72 + terra)	Choke (com filtro modo comum da placa "")	O filtro de modo comum tem a função de atenuar o ruído de modo comum induzido na placa. Na placa "" temos tanto o filtro Y como o choke. Na placa "Apollo" apenas o filtro Y foi utilizado. A intenção é comparar as duas soluções.																																																																																																																																																																																																															
C.	Indutores	L1+L2 (atual)	L1 apenas	O indutor L2 foi adicionado antes de ser adicionado o filtro Y. A intenção é entender a sua influência e necessidade no projeto para a filtragem de ruidos.																																																																																																																																																																																																															
D.	Conexão Placa Interface	Porta Freezer (atual)	Porta Refrigerator (cuirs)	Durante testes de desenvolvimento, foi visto que o ruído conduzido diminuía muito com a diminuição do tamanho da rede elétrica entre a placa "Apollo" e "Pegasus".																																																																																																																																																																																																															
E.	Roteamento do Cordeiro de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual	Direto para conector	Atualmente, a passagem alocada na caixa plástica para a entrada do cordeiro de alimentação, em direção ao conector, pode estar criando um caminho direito por cima da fonte, onde ruído é acoplado diretamente sobre o cordeiro.																																																																																																																																																																																																															
F.	Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual	Atual + -1W (1A Fm DC)	O consumo de corrente DC da fonte, afeta diretamente o controle da fonte chaveada. Um maior consumo pode modificar o duty cycle da chave, gerando mais ruído.																																																																																																																																																																																																															
G.	Disposição da rede elétrica dentro da caixa	Afastados da Fonte	Próximos a Fonte	Na linha de produção e no projeto, não existe um controle exato da onde a fiação vai "parar" após a tampa da caixa ser fechada. Fazendo correndo parte de componentes ruídos, ou perto do cordão de alimentação, favorece acoplamentos.																																																																																																																																																																																																															
H.	Trançamento do cabo de alimentação	Atual	Trançado	O trançamento cria uma indutância no cordão de alimentação, que se opõe à variação de corrente, sendo assim potencialmente um fator natural para ruidos.																																																																																																																																																																																																															
I.																																																																																																																																																																																																																			
Variáveis de Fundo (Ruído)				Método de Controle																																																																																																																																																																																																															
Ambiente Eletromagnético				Teste em câmara com paredes metálicas e planos de terra verticais e horizontais																																																																																																																																																																																																															
Temperatura ambiente				Não controlada, mas mantida entre 22 e 30 graus																																																																																																																																																																																																															
Operador				Joao Dorges																																																																																																																																																																																																															
Produto				Apenas 1 utilizado																																																																																																																																																																																																															
4) Previsões: Check Next TAB																																																																																																																																																																																																																			
4.1) Efeitos Principais																																																																																																																																																																																																																			
(-) A (+) (-) B (+) (-) C (+) (-) D (+)																																																																																																																																																																																																																			
(-) E (+) (-) F (+) (-) G (+) (-) H (+)																																																																																																																																																																																																																			
5) Matriz do Experimento e Estrutura de Confundimento:																																																																																																																																																																																																																			
<table border="1"><thead><tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>32</th><th>33</th><th>34</th><th>35</th><th>36</th><th>37</th><th>38</th><th>39</th><th>40</th><th>41</th><th>42</th><th>43</th><th>44</th><th>45</th><th>46</th><th>47</th><th>48</th><th>49</th><th>50</th><th>51</th><th>52</th><th>53</th><th>54</th><th>55</th><th>56</th><th>57</th><th>58</th><th>59</th><th>60</th><th>61</th><th>62</th><th>63</th><th>64</th><th>65</th><th>66</th><th>67</th><th>68</th><th>69</th><th>70</th><th>71</th><th>72</th><th>73</th><th>74</th><th>75</th><th>76</th><th>77</th><th>78</th><th>79</th><th>80</th><th>81</th><th>82</th><th>83</th><th>84</th><th>85</th><th>86</th><th>87</th><th>88</th><th>89</th><th>90</th><th>91</th><th>92</th><th>93</th><th>94</th><th>95</th><th>96</th><th>97</th><th>98</th><th>99</th><th>100</th></tr></thead><tbody><tr><td>DOE</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>36</td><td>37</td><td>38</td><td>39</td><td>40</td><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td>44</td><td>45</td><td>46</td><td>47</td><td>48</td><td>49</td><td>50</td><td>51</td><td>52</td><td>53</td><td>54</td><td>55</td><td>56</td><td>57</td><td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td><td>72</td><td>73</td><td>74</td><td>75</td><td>76</td><td>77</td><td>78</td><td>79</td><td>80</td><td>81</td><td>82</td><td>83</td><td>84</td><td>85</td><td>86</td><td>87</td><td>88</td><td>89</td><td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td></tr></tbody></table>											1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	DOE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																															
DOE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																															
Conclusões periféricas: >> A maior fonte de ruído aparenta ser de modo comum, uma vez que as medidas de redução de ruído de modo comum foram as que mais reduziram o ruído conduzido nos experimentos. >> Fontes possíveis de ruído de modo comum: >> Acoplamento do ruído da fonte através da fiação do ventilador DC >> Acoplamento do ruído da fonte através da fiação da placa interface - teoria que pode ser considerada enfatizada pelo resultado do fator D. Menor fiação, menor caminho de acoplamento de ruído de modo comum																																																																																																																																																																																																																			
Outras observações: Triando um dos tratamentos, nenhum dos tratamentos efetuados efetivamente apresentou níveis de ruído conduzido aceit																																																																																																																																																																																																																			

Figura 61 - Formulários de Planejamento de DOEs. Extraído de MOEN[24]

Formulário de Planejamento DOE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
1) Objetivo: Clarificar e confirmar alguns fatores observados em DOE anterior. Além disso, identificar novos fatores que ajudem a reduzir ainda mais o ruído conduzido, ajustando o produto à norma.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2) Informações anteriores: Do DOE-1, pudemos observar que: H - Trançamento do cordão de alimentação. Mostrou-se inativo em todas as análises. Será mantido sem trançamento G - Descartado também, devido a extrema dificuldade de execução // // // A - Capacitor de modo diferencial. Será mantido no nível (-). Fatores que podem ser mantidos nos níveis de melhor resultado C - uso de 2 indutores de modo comum Fatores que devem ser melhor estudados B - Filtro de Modo comum // // // D - Comprimento Interface.. por que? E - Confirmação do efeito deste fator // // // F - Mantido para entender este fator de ruído. Conclusões perifericas >> A maior fonte de ruído = modo comum, já que as medidas de redução de ruído de modo comum foram as que mais reduziram o ruído conduzido nos experimentos. >> Fontes possíveis de ruído de modo comum: - Acoplamento do ruído da fonte através da fiação do ventilador DC - Acoplamento do ruído da fonte através da fiação da placa interface - teoria que pode ser considerada enfatizada pelo resultado do fator D. Menor fiação, menor acoplamento de ruído de modo comum. Outras observações: Tirando um dos tratamentos, nenhum dos tratamentos efetuados efetivamente apresentou níveis de ruído conduzido aceitáveis em norma. Ou seja, os fatores selecionados NOS níveis selecionados ainda nao foram suficientes para atenuar o ruído emitido pelo produto.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3) Estratégia experimental e variáveis : $2, \sqrt{8}, 4$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Variáveis de Resposta		Técnica de Medição																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Y1.1 = Média - Faixa A (150kHz - 2MHz)		Medição do Ruído conduzido, conforme CISPR14.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Y1.2 = Média - Faixa B (2MHz - 10MHz)		Separação da faixa de interesse, e cálculo matemático da média																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Y1.3 = Média - Faixa C (10MHz - 30MHz)		Idem anterior																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Y2 = Máximo - Faixa A (150kHz - 2MHz)		Medição do Ruído conduzido, conforme CISPR14.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		Separação da faixa de interesse, e busca do valor máximo no intervalo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Fatores	Níveis	Teorias																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	(-) (+)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A. Capacitor C10	150nF (atual)	Fator inativo em DOE anterior, mostrando que ruído diferencial não é o foco.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
B. Filtro Modo Comum	Y (Atua)	Choke + Y																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
C. Indutores Modo Diferencial	L1+L2 (atual)	L1 apenas																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
D. Conexão Placa Interface	Porta Freezer (atual)	Porta Refrigerador (curto)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
E. Roteamento do Cordão de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual	Direto para conector																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
F. Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual	Atual + ~1W (1 Fan DC)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
G. Disposição da rede elétrica dentro da caixa	N/A																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H. Trançamento do cabo de alimentação	Atual	Fator inativo em DOE anterior.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
I. Trançamento do cordão da interface	Atual	Trançado																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
J. Distanciamento do cabo da interface, da chapa do produto	Atual	D = aprox 2cm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
K. Ferrite de Modo Comum	Sem	Com																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Variáveis de Fundo (Ruído)		Método de Controle																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Ambiente Eletromagnético		Teste em câmara com paredes metálicas e planos de terra verticais																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Temperatura ambiente		Nao controlada, mas mantida entre 22 e 30 graus																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Operador		Joao Borges																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Produto		Apenas 1 utilizado, 220Volts																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
4) Previsões: Check Next TAB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
4.1) Efeitos Principais																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
5) Matriz do Experimento e Estrutura de Confundimento:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Confundimentos</th> <th>K1</th> <th>DSE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BPE</td> <td>C10</td> <td>J1</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C1</td> <td>J2</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C2</td> <td>J3</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C3</td> <td>J4</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C4</td> <td>J5</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C5</td> <td>J6</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C6</td> <td>J7</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C7</td> <td>J8</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C8</td> <td>J9</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C9</td> <td>J10</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C10</td> <td>J11</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C11</td> <td>J12</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C12</td> <td>J13</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C13</td> <td>J14</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C14</td> <td>J15</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C15</td> <td>J16</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C16</td> <td>J17</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C17</td> <td>J18</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C18</td> <td>J19</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C19</td> <td>J20</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C20</td> <td>J21</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C21</td> <td>J22</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C22</td> <td>J23</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C23</td> <td>J24</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C24</td> <td>J25</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C25</td> <td>J26</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C26</td> <td>J27</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C27</td> <td>J28</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C28</td> <td>J29</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C29</td> <td>J30</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C30</td> <td>J31</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C31</td> <td>J32</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C32</td> <td>J33</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C33</td> <td>J34</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C34</td> <td>J35</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C35</td> <td>J36</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C36</td> <td>J37</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C37</td> <td>J38</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C38</td> <td>J39</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C39</td> <td>J40</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C40</td> <td>J41</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C41</td> <td>J42</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C42</td> <td>J43</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C43</td> <td>J44</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C44</td> <td>J45</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C45</td> <td>J46</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C46</td> <td>J47</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C47</td> <td>J48</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C48</td> <td>J49</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C49</td> <td>J50</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C50</td> <td>J51</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C51</td> <td>J52</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C52</td> <td>J53</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C53</td> <td>J54</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C54</td> <td>J55</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C55</td> <td>J56</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C56</td> <td>J57</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C57</td> <td>J58</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C58</td> <td>J59</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C59</td> <td>J60</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C60</td> <td>J61</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C61</td> <td>J62</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C62</td> <td>J63</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C63</td> <td>J64</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C64</td> <td>J65</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C65</td> <td>J66</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C66</td> <td>J67</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C67</td> <td>J68</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C68</td> <td>J69</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C69</td> <td>J70</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C70</td> <td>J71</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C71</td> <td>J72</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C72</td> <td>J73</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C73</td> <td>J74</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C74</td> <td>J75</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C75</td> <td>J76</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C76</td> <td>J77</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C77</td> <td>J78</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C78</td> <td>J79</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C79</td> <td>J80</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C80</td> <td>J81</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C81</td> <td>J82</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C82</td> <td>J83</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C83</td> <td>J84</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C84</td> <td>J85</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C85</td> <td>J86</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C86</td> <td>J87</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C87</td> <td>J88</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C88</td> <td>J89</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C89</td> <td>J90</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C90</td> <td>J91</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C91</td> <td>J92</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C92</td> <td>J93</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C93</td> <td>J94</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C94</td> <td>J95</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C95</td> <td>J96</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C96</td> <td>J97</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C97</td> <td>J98</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C98</td> <td>J99</td> </tr> <tr> <td>BD</td> <td>C99</td> <td>J100</td> </tr> </tbody> </table>				Confundimentos	K1	DSE	BPE	C10	J1	BD	C1	J2	BD	C2	J3	BD	C3	J4	BD	C4	J5	BD	C5	J6	BD	C6	J7	BD	C7	J8	BD	C8	J9	BD	C9	J10	BD	C10	J11	BD	C11	J12	BD	C12	J13	BD	C13	J14	BD	C14	J15	BD	C15	J16	BD	C16	J17	BD	C17	J18	BD	C18	J19	BD	C19	J20	BD	C20	J21	BD	C21	J22	BD	C22	J23	BD	C23	J24	BD	C24	J25	BD	C25	J26	BD	C26	J27	BD	C27	J28	BD	C28	J29	BD	C29	J30	BD	C30	J31	BD	C31	J32	BD	C32	J33	BD	C33	J34	BD	C34	J35	BD	C35	J36	BD	C36	J37	BD	C37	J38	BD	C38	J39	BD	C39	J40	BD	C40	J41	BD	C41	J42	BD	C42	J43	BD	C43	J44	BD	C44	J45	BD	C45	J46	BD	C46	J47	BD	C47	J48	BD	C48	J49	BD	C49	J50	BD	C50	J51	BD	C51	J52	BD	C52	J53	BD	C53	J54	BD	C54	J55	BD	C55	J56	BD	C56	J57	BD	C57	J58	BD	C58	J59	BD	C59	J60	BD	C60	J61	BD	C61	J62	BD	C62	J63	BD	C63	J64	BD	C64	J65	BD	C65	J66	BD	C66	J67	BD	C67	J68	BD	C68	J69	BD	C69	J70	BD	C70	J71	BD	C71	J72	BD	C72	J73	BD	C73	J74	BD	C74	J75	BD	C75	J76	BD	C76	J77	BD	C77	J78	BD	C78	J79	BD	C79	J80	BD	C80	J81	BD	C81	J82	BD	C82	J83	BD	C83	J84	BD	C84	J85	BD	C85	J86	BD	C86	J87	BD	C87	J88	BD	C88	J89	BD	C89	J90	BD	C90	J91	BD	C91	J92	BD	C92	J93	BD	C93	J94	BD	C94	J95	BD	C95	J96	BD	C96	J97	BD	C97	J98	BD	C98	J99	BD	C99	J100
Confundimentos	K1	DSE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BPE	C10	J1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C1	J2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C2	J3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C3	J4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C4	J5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C5	J6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C6	J7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C7	J8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C8	J9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C9	J10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C10	J11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C11	J12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C12	J13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C13	J14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C14	J15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C15	J16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C16	J17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C17	J18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C18	J19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C19	J20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C20	J21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C21	J22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C22	J23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C23	J24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C24	J25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C25	J26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C26	J27																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C27	J28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C28	J29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C29	J30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C30	J31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C31	J32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C32	J33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C33	J34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C34	J35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C35	J36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C36	J37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C37	J38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C38	J39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C39	J40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C40	J41																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C41	J42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C42	J43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C43	J44																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C44	J45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C45	J46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C46	J47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C47	J48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C48	J49																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C49	J50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C50	J51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C51	J52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C52	J53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C53	J54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C54	J55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C55	J56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C56	J57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C57	J58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C58	J59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C59	J60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C60	J61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C61	J62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C62	J63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C63	J64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C64	J65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C65	J66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C66	J67																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C67	J68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C68	J69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C69	J70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C70	J71																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C71	J72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C72	J73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C73	J74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C74	J75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C75	J76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C76	J77																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C77	J78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C78	J79																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C79	J80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C80	J81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C81	J82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C82	J83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C83	J84																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C84	J85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C85	J86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C86	J87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C87	J88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C88	J89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C89	J90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C90	J91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C91	J92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C92	J93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C93	J94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C94	J95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C95	J96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C96	J97																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C97	J98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C98	J99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BD	C99	J100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
6) Repetição ou Réplica, Método de randomização, Restrições Experimento Completamente randomizado. Sem repetições, réplicas ou blocos. Restrição de Qtde de Placas disponíveis e prazo de atendimento.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
7) Custo estimado, programação e outras considerações de recursos Como um ensaio dura em média 20 minutos (da experiência anterior), mais um tempo estimado de 10 minutos de setup, temos um tempo aproximado de 30 minutos por experimento. 32 x 30 = 16h. Isto significa 2,5 dias aproximadamente considerando-se pequenos imprevistos.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

Figura 62 - Formulários de Planejamento de DOE2. Extraído de MOEN[24]

Formulário de Planejamento DOE

1) Objetivo:

Após executar o DOE 2, algumas conclusões ficaram evidentes. Ainda, a solução que se mostrou aceitável pela norma, não é a melhor em termos de custo. Este experimento visa explorar melhor os dois fatores (espagamento e tamanho da rede), mudando seus níveis, para entender possibilidades alternativas para passar na norma, sem o ferrite.

2) Informações anteriores:

3) Estratégia experimental e variáveis : 2_{FULL}³





Variáveis de Resposta	Técnica de Medição
Y1.1 – Média - Faixa A (150kHz - 2MHz)	Medição do Ruído conduzido, conforme CISPR14.
Y1.2 – Média - Faixa B (2MHz - 10MHz)	Separação da faixa de interesse, e cálculo matemático da média
Y1.3 – Média - Faixa C (10MHz - 30MHz)	Idem anterior
Y2 – Máximo - Faixa A (150kHz - 2MHz)	Medição do Ruído conduzido, conforme CISPR14.
	Separação da faixa de interesse, e busca do valor máximo no intervalo

Fatores	Níveis	Teorias	
	(-)	(+)	
A. Capacitor C10	150nF (atual)		Fator inativo em DOE anterior, mostrando que ruído diferencial não é o foco.
B. Filtro Modo Comum	Y (Atual, com C71 e C72 + terra)		Estudo da melhor solução do DOE anterior, e uma combinação das duas possíveis.
C. Indutores Modo Comum	L1+L2 (atual)		O indutor L2 foi adicionado antes de ser adicionado o filtro Y. A intenção é entender a sua influência e necessidade no projeto para a filtragem de ruídos de modo comum.
D. Conexão Placa Interface	Porta Freezer (atual)	Porta Freezer reduzida	Durante testes de desenvolvimento, foi visto que o ruído conduzido diminuía muito com a diminuição do tamanho da rede elétrica entre a placa "A" e a placa "T".
E. Roteamento do Cordão de Alimentação ao chegar na placa Eletrônica	Atual		Atualmente, a passagem colocada na caixa plástica para a entrada do cordão de alimentação, em direção ao conector, pode estar criando um caminho direto por cima da fonte, onde ruído é acoplado diretamente sobre o cordão.
F. Potência consumida pelas cargas DC, da fonte de alimentação	Atual		O consumo de corrente DC da fonte, afeta diretamente o controle da fonte chamada. Um maior consumo pode aumentar o duty cycle da chave, gerando mais ruído
G. Disposição da rede elétrica dentro da caixa	N/A		Fator inativo em DOE anterior. Principalmente devido ao fato de que sua execução foi muito difícil.
H. Trançamento do cabo de alimentação	Atual		Fator inativo em DOE anterior.
I. Trançamento do cordão da interface	Atual		De acordo com EMC for Product Designers, pg 269, cabo trançado pode ser útil inclusive para ruído de modo comum.
J. Distanciamento do cabo da interface, da chapa do produto	Atual	D=aprox 4cm	Com o cordão distanciado da chapa do produto, se o acoplamento capacitivo do ruído de modo comum estiver
K. Ferrite de Modo Comum	Sem	Com	Se o ruído predominante é de modo comum, um ferrite na linha de terra pode ser uma solução para reduzir.
L.			


Variáveis de Fundo (Ruído)	Método de Controle
Ambiente Eletromagnético	Teste em câmara com paredes metálicas e planos de terra verticais
Temperatura ambiente	Não controlada, mas mantida entre 22 e 30 graus
Operador	João Borges
Produto	Apenas 1 utilizado

4) Previsões: Check Next TAB

4.1) Efeitos Principais

			
(-) A (+)	(-) B (+)	(-) C (+)	(-) D (+)

4.2) Interações

			
(-) A (+)	(-) B (+)	(-) C (+)	(-) D (+)

5) Matriz do Experimento e Estrutura de Confundimento:

6) Repetição ou Réplica, Método de randomização, Restrições

Experimento com RÉPLICA, para uma estimativa do RUÍDO do experimento

7) Custo estimado, programação e outras considerações de recursos

Como um ensaio dura em média 20 minutos (da experiência anterior), mais um tempo estimado de 10 minutos de setup, temos um tempo aproximado de 30 minutos por experimento. 32 x 30 = 16h. Isto significa 2,5 dias aproximadamente considerando-se pequenos imprevistos.

Figura 63 - Formulários de Planejamento do DOE 3. Extraído de MOEN[24]

ANEXO 5 – WHOLE PLOT E SPLIT PLOT

A figura mostra a representação de curvas de distribuição do ruído considerando o experimento completamente randomizado (pontilhado azul), Whole Plot (preto) e Split Plot (vermelho), além de mostrar dois fatores sob estudo, sendo eles os fatores T e V. Supondo que o experimento é restrito e tem o fator T no *Split Plot* e o fator V no *Whole Plot*, a análise ignorando esta restrição levaria a crer que o fator V seria significativo e o fator T não seria (está dentro da distribuição do ruído). No entanto, ao considerar a restrição na análise, veria-se que o fator T na realidade seria significativo, enquanto o fator V seria considerado ruído dentro da distribuição de ruído do *Whole Plot*.

Com isto, o que fica claro é que nunca deve-se ignorar as restrições a randomização, a menos haja informação de que as restrições não são fortes, seja via dados históricos de experimentos realizados, ou dados de análise do próprio experimento, geralmente comparando uma abordagem regular com a análise de Rank.

ANEXO 6 – PROGRAMA DE LEITURA E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Todos os dados foram coletados e armazenados no computador, utilizando a infraestrutura do MagLab. O mesmo como já supracitado conta com um Receiver R&S ESPC. Os dados são passados do Receiver a um microcomputador, através de um barramento GPIB, e utilizando um programa proprietário. Os dados são armazenados em formato de texto, separado por tabulações. Um estudo foi feito, para descobrir este formato de armazenamento, de forma a ser possível a criação de um programa que pudesse abrir esses arquivos gerados, e realizar as operações necessárias.

Um programa foi então criado, utilizando a linguagem LabVIEW®, e a aparência principal do programa pode ser vista na Figura 66.

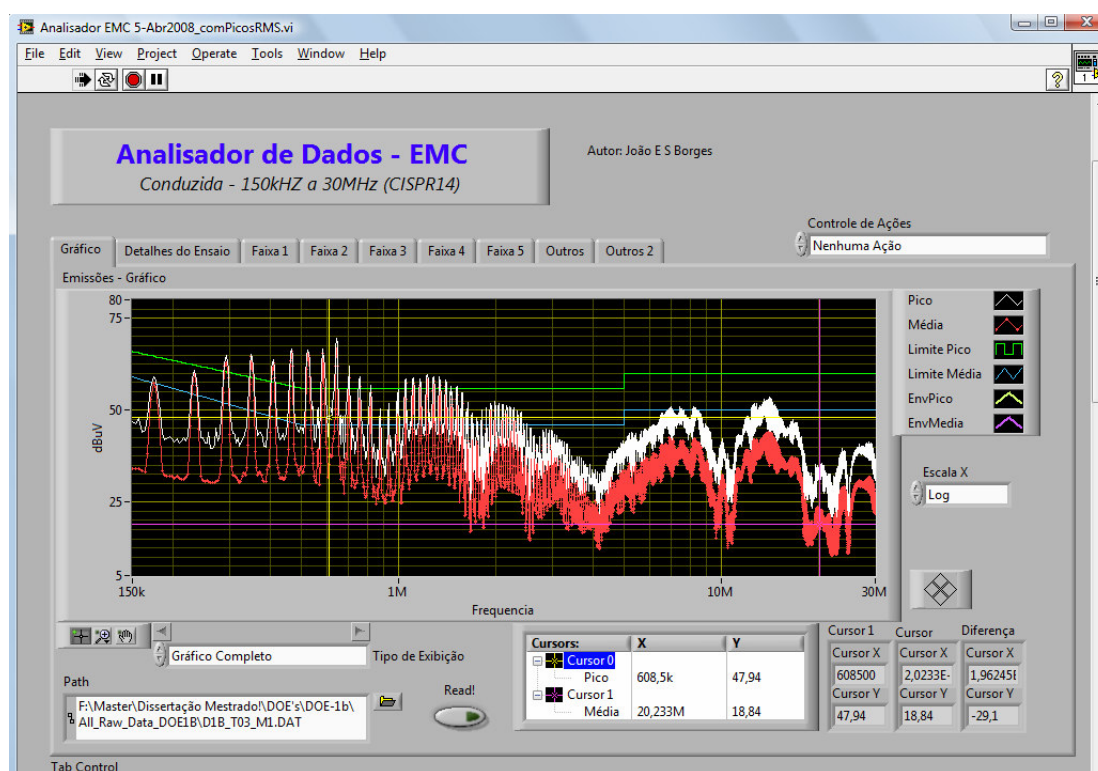


Figura 66 - Analisador de Dados de Ensaios

A partir de dados de frequência inicial e final de até 5 faixas e dos dados brutos obtidos a partir da decodificação dos arquivos de aquisição de dados do programa ESPC, o programa separa os dados de cada faixa, por pico ou média, e calcula as variáveis de interesse, no caso valor médio e valor máximo. Na Figura 67 pode-se ver parte do código onde são feitas essas operações matemáticas.

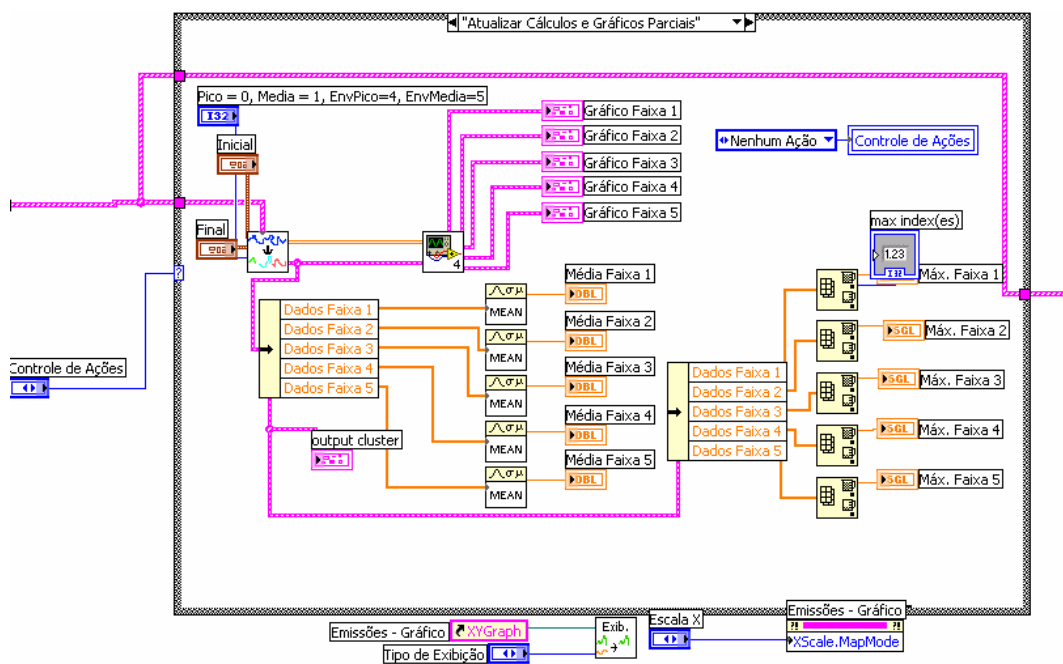


Figura 67 – Código fonte parcial do Analisador de Dados

ANEXO 7 – PROGRAMA DE ANÁLISE – NPP E PARETO (COM FATORES ATIVOS)

Durante o trabalho de experimentação, surgiu a necessidade de criar um software específico para análise de experimentos fatoriais fracionados, no que diz respeito a seção do *Split Plot*. Isto ocorreu devido a uma lacuna existente no software estatístico JMP®, no qual a análise das restrições não é simples de ser executada. Assim sendo, partiu-se para o estudo dos detalhes de gráficos de probabilidade normal, e cálculo de fatores ativos em fatoriais fracionados, utilizando o método mais comum que é o de LENTH [13]. O programa foi dividido em 3 grandes seções:

- Leitura do arquivo de dados
- Cálculo do PSE (*Pseudo Standard Error*)
- Criação do gráfico de Probabilidade Normal
- Criação do gráfico de Pareto
- Determinação dos fatores ativos, com a distribuição de t-Student e uso do PSE.

A tela principal do programa pode ser vista na Figura 68. No programa basicamente escolhe-se um arquivo que contenha os fatores e seus respectivos efeitos calculados, e a partir de um Alfa (α) escolhido (normalmente 0,2 para experimentos exploratórios), o programa pode fazer os cálculos apropriados para a obtenção dos dois gráficos já supracitados, e também a determinação dos efeitos ativos.

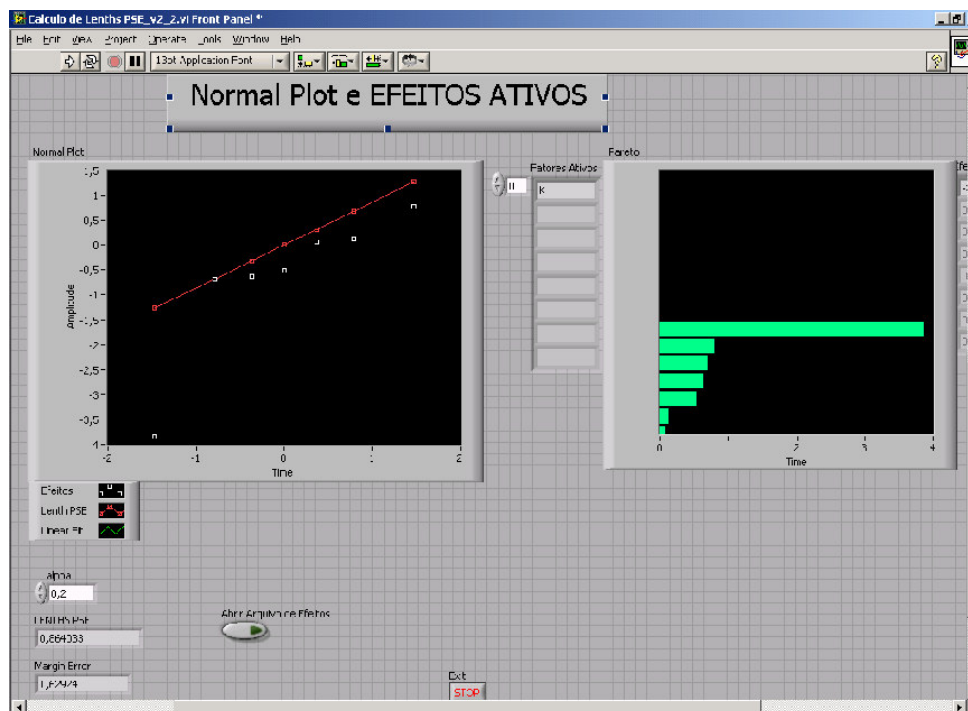


Figura 68 – Cálculo do NPP e dos efeitos ativos

O princípio da esparsidade é aplicado principalmente quando tempos experimentos fatoriais não replicados. Neste caso, não existem graus de liberdade para estimar o erro do experimento, e logo, a aplicação dos testes estatísticos comuns não são possíveis. LENTH [13], em 1989 criou um método de, usando o princípio da esparsidade, criar um Pseudo Erro Padrão ou PSE (do inglês, Pseudo Standard Error). A idéia é utilizar os fatores menos ativos na geração de uma estimativa de erro, ou melhor dizendo, não considerar na linha de melhor ajuste dos dados do NORMAL PLOT os fatores ativos.

O cálculo do PSE é feito da seguinte forma:

1. São calculados os valores absolutos dos efeitos e armazenados;
2. Calcula-se $S = 1.5 * (\text{mediana dos valores absolutos calculados})$;
3. Calcula-se a mediana dos valores absolutos calculados no primeiro passo, que são menores que $2.5 * S$.
4. O PSE de LENTH = $1.5 * (\text{mediana calculada no passo 3})$.

O procedimento acima pode ser visto na seção de código abaixo:

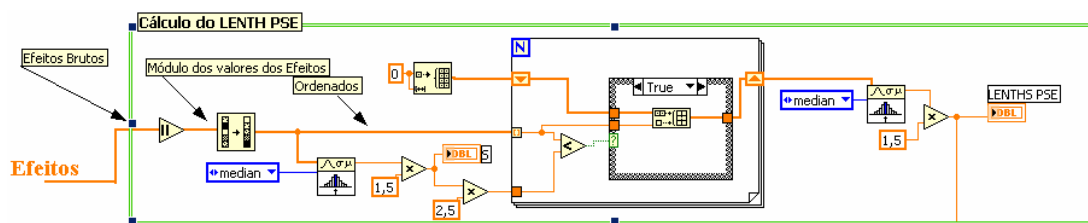


Figura 69 – Código fonte do cálculo do LENTH PSE

Feito este passo, em paralelo no programa criado, eram organizados os dados para poder desenhar o Gráfico de Probabilidade Normal, ou NPP (Normal Probability Plot). Uma das várias maneiras de gerar este gráfico é:

1. Ordenar os efeitos do menor para o maior e numerá-los com valores de $i=1,2,...,n$, onde o menor valor será 1 e o maior n
2. Calcular $\frac{(i - 0,5)}{n}$ para $i=1$ até n
3. Obter uma probabilidade normal (*z-score*) baseado em tabelas ou um cálculo de densidade de probabilidade inverso.
4. Desenhar o gráfico de valor ordenado contra seu *z-score*.

No mesmo gráfico de probabilidade normal, também pode-se colocar a linha de melhor ajuste, baseada no cálculo do PSE de LENTH. Basicamente o que é feito, é uma linha com eixo X

sendo no z -score, e inclinação igual a $1/PSE$. O código fonte dos passos acima em LabVIEW® pode ser visto abaixo.

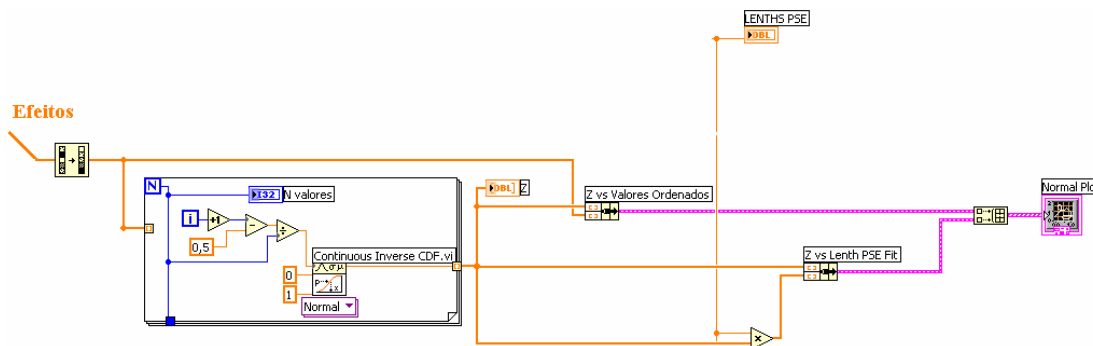


Figura 70 – Código fonte do z -score e geração do gráfico Normal Plot

Um exemplo de gráfico gerado com este código pode ser visto na Figura 67.

Uma vez que já pode-se visualizar o gráfico de probabilidade normal e foi calculado o PSE de LENTH, o próximo passo é, utilizando a distribuição de t -Student, determinar os fatores ativos, para o grau de confiança Alfa (α). O meio de fazer esta matemática, é através da criação o chamado Erro marginal ou *Margin Error* (ME). Todos os fatores com efeito maior do que este erro, são considerados ativos. A equação do ME pode ser encontrada abaixo.

$$ME = t * PSE \quad (A7 - 1)$$

O valor de t é o quartil $(1-\alpha/2)$ de uma distribuição do tipo t -Student, com um número de graus de liberdade igual a $(\text{número de efeitos})/3$. A implementação da matemática descrita pode ser vista abaixo.

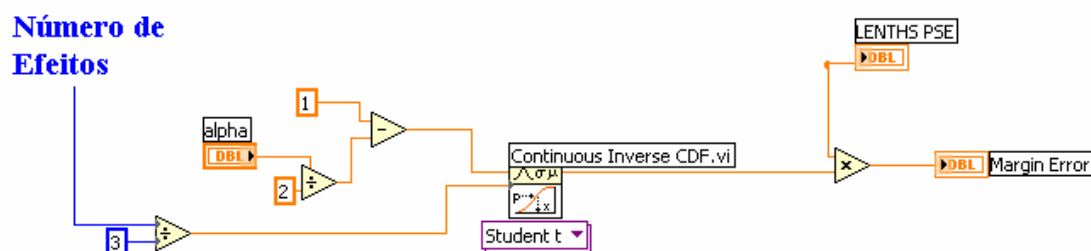


Figura 71 – Código fonte cálculo da Margem de Erro (*Margin Error*, ME)

Com base na comparação do valor absoluto de cada efeito com o cálculo da Margem de Erro, é possível determinar quais fatores são ativos para qualquer valor de Alfa escolhido. Uma das maneiras mais comuns de mostrar os efeitos dos fatores, e além disso mostrar quais são significativos graficamente é utilizando um gráfico de Pareto.

Na Figura 72 pode-se ver o gráfico gerado, com apenas um efeito ativo comparado com o ME e um Alfa de dois (para dados de exemplo apenas).

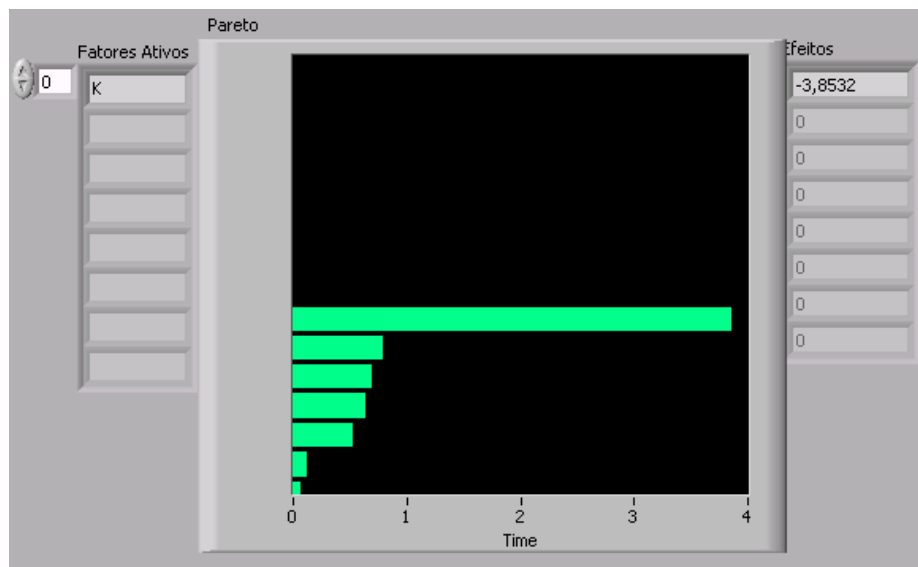


Figura 72 – Exemplo de gráfico de Pareto

Com o programa criado, as análises de *Split Plot* foram extremamente facilitadas, e grande ganho de confiança nos processos matemáticos foi obtido pelo estudo mais aprofundado da teoria envolvendo as conclusões de LENTH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BISGAARD, S. Teaching Statistics to Engineers. *American Statistical Association Annual Meeting*. August 7th. Washington D.C 1980.
- [2] OLIVEIRA, Pedro Luiz Lüdke de. *Avaliação de Processos de Medição no Contexto da Metodologia Seis Sigma em uma Empresa Industrial*. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – LabMETRO – Laboratório de Metrologia e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] BREYFOGLE, F; CUPELLO, J; MEADOWX, B. *Managing Six Sigma. A practical guide to understanding, assessing and implementing the strategy that yields bottom-line success*. John Wiley & Sons, USA, 2001.
- [4] *Scientific Method*. WIKIPEDIA – The Free Encyclopedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Scientific_method. Acessado em 2008.
- [5] HILD, C; SANDERS, D; ROSS, B. The Thought Map. *Quality Engineering*, Vol. 12, No. 1, p. 21-27, September 1999.
- [6] W. Edwards Deming. WIKIPEDIA – The Free Encyclopedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/W._Edwards_Deming. Acessado em 2008.
- [7] SANDERS, D; ROSS, B; COLEMAN, J. The Process Map. *Quality Engineering*, Vol. 11, No. 4, p. 555-561, July 1999.
- [8] SHEWHART, W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. *American Society of Quality Control*, Milwaukee, Wisconsin, 1980.
- [9] WHEELER, D. J.; CHAMBERS, D. S. *Understanding Statistical Process Control*. 2a Ed. Knoxville, Tennessee: SPC Press. 1992.

- [10] *Engineering Statistics Handbook – 6.3.2.1-Shewhart X-bar and R/ S Control Charts*. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc321.htm>. Acessado em 2008.
- [11] PATNAIK, P. B. The use of mean of range as an estimator of variance in statistical tests. *Biometrika*, Vol. 37, p. 78-87, 1950.
- [12] INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*. 5ª Edição - Portaria N° 029 de 1995. Rio de Janeiro
- [13] LENTH, R. V. Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials. *Technometrics*, Vol. 31, No. 4, pp. 469-473, November 1989.
- [14] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques). “Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus – Part 1: Emission”. CISPR 14-1, Genebra, 2000
- [15] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques). “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus”. CISPR 16-1, Genebra, 1999.
- [16] WILLIAMS, T. *EMC for Product Designers – Meeting the European Directive*. 3rd ed. Great Britain. Newness, 2001.
- [17] *The Expression of Uncertainty in EMC Testing*. UKAS Publication LAB 34, 1st Ed. 2002
- [18] *The Handy Guide to EMC Measurement Uncertainty*. Schaffner EMC Systems Ltd. 2002

- [19] RAIZER, A. ; NYLAND, Felipe ; AMARAL, Matheus Hammes . *Cálculo de incerteza para compatibilidade eletromagnética*. In: Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. Belo Horizonte. VII SEMETRO, 2007.
- [20] BISGAARD, S. Quality Quandaries. Why Three-level Designs are not so Useful for Technological Experiments. *Quality Engineering*, Vol 8 No. 4 pp 705-708. 1996.
- [21] HAMADA, M., BALAKRISHNAN, N. Analyzing Unreplicated Factorial Experiments: A Review with some New Proposals. *Statistica Sinica*, Vol 8. pp 1-41. 1998.
- [22] MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 5th Ed. USA: John Wiley & Sons. 2001
- [23] SANDERS, D., COLEMAN, J. Recognition and importance of restrictions on randomization in industrial experimentation. *Quality Engineering*, Vol. 15 No.4, pp.533-43. 2003
- [24] MOEN, R. D., NOLAN, T. W., PROVOST L. P. *Quality Improvement through Planned Experimentation*. 2nd Ed. USA. McGraw-Hill. 1999
- [25] TORRES, V. A. A Simple Analysis of Unreplicated Factorials with Possible Abnormalities. *Journal of Quality Technology*. Milwaukee, USA. Vol 25 No. 3, pp 183-187. July 1993
- [26] MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 2^a Edição. Rio de Janeiro. LTC Editora. 2003.
- [27] *Type I and type II errors*. WIKIPEDIA – The Free Encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Type_I_and_type_II_errors .Acessado em 2008
- [28] *P-value*. WIKIPEDIA – The Free Encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/P-value> .Acessado em 2008